

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

علوم و فناوری نانو گرایش نانوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد نانوفیزیک

بهبود بازده سلول های خورشیدی سیلیکونی با استفاده از لایه های اپتیکی

نانوساختار

نگارنده: سعید صالح پور

استاد راهنما

دکتر حمید هراتی زاده

استاد مشاور

دکتر رحیم لطفی اوریمی

تیر ۱۳۹۶

ب

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که همواره در سختی راه، پشتیبان و یاریگر من بودند و حال دستاورد و شیرینی
پیروزی را به آنها پیشکش می دارم.

و تقدیم به همه ی آنان که برای سرفرازی و پیشرفت دیارشان، کوشیده اند.

تشکر و قدردانی

از پدر و مادر عزیزم که صبورانه مرا یاری نمودند و مایه ی دلگرمی من بودند،

سپاس گذارم و قدردان حمایت های آنها هستم.

از استاد بزرگوارم جناب دکتر هراتی زاده که دو ویژگی اخلاق نیک و پشتکار در

ایشان مثال زدنیست و الگوی بنده هست، سپاس گذارم.

تعهد نامه

اینجانب سعید صالح پور دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی علوم و فناوری نانو گرایش نانوفیزیک دانشکده‌ی فیزیک و مهندسی هسته‌ی ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان نامه‌ی بهبود بازده سلول های خورشیدی سیلیکونی با استفاده از لایه های اپتیکی نانو ساختار تحت راهنمایی جناب آقای دکتر حمید هراتی زاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۶/۴/۲۶

امضای دانشجو



مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از عوامل مهم پایین بودن بازده سلولهای خورشیدی سیلیکونی عدم تطابق طیفی، انرژی فوتون های ورودی با گاف انرژی سلول خورشیدی می باشد. فوتون های با انرژی پایین تر از گاف انرژی، جذب نمی شوند و فوتون های با انرژی بالاتر، انرژی اضافه شان به صورت انرژی جنبشی جفت الکترون-حفره ی تولید شده در می آید و در نتیجه به صورت گرما هدر می رود.

طیف فرابنفش بخشی از طیف گسیلی خورشید می باشد که انرژی زیادی دارد، انرژی این بخش از طیف فراتر از میزان گاف انرژی سیلیکون می باشد، از این رو این بخش از طیف با برخورد به سطح سلول خورشیدی سیلیکونی کامل جذب نمی شود و بخشی از انرژی فوتون فرودی به صورت گرما و فونون هدر می رود. در این تحقیق بر آن شدیم تا این بخش از طیف را توسط روشی به بخش قابل جذب تری از طیف که به محدوده ی گاف انرژی سیلیکون نزدیکتر باشد، تبدیل کنیم.

فسفر ماده ای است با خاصیت فتولومینسانس که می تواند پروتو های در محدوده ی طیف فرابنفش نور خورشید را جذب کند و در ناحیه ی مرئی و مادون قرمز نور گسیل کند، به همین دلیل در این پروژه از لایه های فسفر استفاده کردیم، بدین طریق که فسفر را توسط روش لایه نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی روی سلولهای خورشیدی سیلیکونی لایه نشانی نمودیم. عمل لایه نشانی با ضخامت های مختلفی از فسفر تکرار گردید و در هر مرحله با مقایسه ی بازده سلول قبل لایه نشانی و بازده سلول بعد لایه نشانی شاهد افزایش بازده سلول بودیم. لایه های ضخیم تر فسفر بازده را به میزان بیشتری افزایش دادند، با لایه نشانی در ضخامت های بالاتر معلوم گردید افزایش بازده در ضخامت حدود ۲۰۰ نانومتر متوقف می گردد و در لایه های ضخیم تر از ۲۰۰ نانومتر تغییرات بازده روند نزولی دارد.

طیف جذبی فسفر قبل و بعد از لایه نشانی اندازه گیری شد و معلوم شد فسفر مقداری از تابش را که در ناحیه ی فرابنفش قرار دارد جذب می کند. مشخصه یابی لایه های فسفر توسط برانگیزش فتولومینسانس انجام شد و معلوم گردید فسفر در محدوده ی مرئی و مادون قرمز گسیل دارد.

آنالیز XRD از لایه های فسفر به عمل آمد و معلوم شد لایه های فسفر لایه نشانی شده ساختار بی شکل دارند. آنالیز SEM از لایه های فسفر به عمل آمد و معلوم گردید این لایه ها سطوح یکدست و یکنواختی ندارند و فسفر به صورت نقاطی مجزا از هم روی سطح سلول تجمع نموده است.

کلمات کلیدی: بازده، سلولهای خورشیدی سیلیکونی، فسفر، پدیده ی فتوولتائیک

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

صالح پور، سعید؛ هراتی زاده، حمید، (۱۳۹۶). "تبدیل طیف فرابنفش به محدوده‌ی مادون قرمز و نور مرئی برای افزایش بازده سلولهای خورشیدی سیلیکونی"، اولین کنگره ملی کاربرد مواد و ساخت پیشرفته در صنایع، ۳ الی ۵ خرداد ماه ۱۳۹۶، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله ی فوق جزو مقالات برتر در بخش ارائه ی شفاهی اولین کنگره ملی کاربرد مواد و ساخت پیشرفته در صنایع انتخاب شده است.

فهرست مطالب

- فصل اول: انواع نسل های سلول خورشیدی و پدیده ی فتوولتائیک ۱
- مقدمه: ۲
- ۱-۱ پدیده ی فتوولتائیک چیست؟ ۳
- ۲-۱ روش های تبدیل نور خورشید به الکتریسیته ۳
- ۳-۱ مکانیزم عملکرد سلولهای خورشیدی ۴
- ۴-۱ مزایای استفاده از سیستم های فتوولتائیک ۵
- ۵-۱ معایب استفاده از سیستم های فتوولتائیک ۵
- ۶-۱ کاربردهای سلول خورشیدی ۷
- ۷-۱ انواع نسل های سلول خورشیدی ۷
- ۱-۷-۱ سلول های خورشیدی نسل اول ۹
- ۲-۷-۱ سلولهای خورشیدی نسل دوم ۱۱
- ۱-۲-۷-۱ سلولهای سیلیکونی بیشکل ۱۲
- ۲-۲-۷-۱ سلولهای خورشیدی کادمیم تلوراید ۱۳
- ۳-۲-۷-۱ سلول های خورشیدی CIGS ۱۴
- ۳-۷-۱ سلولهای خورشیدی نسل سوم ۱۵
- ۱-۳-۷-۱ سلولهای خورشیدی نانو بلوری ۱۶
- ۲-۳-۷-۱ سلولهای خورشیدی پلیمری ۱۶

- ۱۶-۱-۳-۷-۳ سلولهای خورشیدی رنگدانه ای ۱۶
- ۱۸-۱-۳-۷-۴ سلولهای خورشیدی متمرکز کننده ۱۸
- ۱۹-۱-۷-۴ سلولهای خورشیدی بر پایه ی پروسکایت ۱۹
- ۲۰-۱-۸ جمع بندی ۲۰
- ۲۵-دوم: مفاهیم مربوط به سیستم های فتوولتائیک ۲۵
- ۲۶-۱-۲ تعریف جرم هوا ۲۶
- ۲۷-۱-۱-۲ تابش و طیف خورشیدی استاندارد شده ۲۷
- ۲۸-۲-۲ جریان اتصال کوتاه ۲۸
- ۲۹-۲-۳ ولتاژ مدار باز ۲۹
- ۲۹-۲-۴ ضریب انباشت سلول خورشیدی ۲۹
- ۳۰-۲-۵ بازده سلول خورشیدی ۳۰
- ۳۱-۲-۶ ساختار سلول های خورشیدی ۳۱
- ۳۳-۲-۷ سلولهای خورشیدی سیلیکونی بهینه ۳۳
- ۳۵-فصل سوم: مروری بر پژوهش های انجام شده در زمینه ی افزایش بهره وری سلول های خورشیدی ۳۵
- ۳۶-۱-۳ مروری بر مقالات ۳۶
- ۴۷-فصل چهارم: آزمایش ها و اندازه گیری ها و نتایج ۴۷
- ۴۸-۱-۴ عوامل پایین بودن بازده سلول های خورشیدی و روش افزایش بازده ۴۸
- ۴۹-۱-۱-۴ ویژگی های ساختاری فسفر ۴۹
- ۴۹-۲-۴ آزمایش های انجام شده ۴۹

۵۰	..... فرایند لایه نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی
۵۴	..... اندازه گیری بازده و سایر پارامتر های سلول خورشیدی سیلیکونی
۵۶	..... نتایج آزمایش ها و آنالیز طیف سنجی نوری UV-VISIBLE و اندازه گیری بازده و پارامترهای سلول خورشیدی
۷۳	..... لایه نشانی اکسید روی به عنوان لایه ی کاهنده ی بازتاب روی سلول خورشیدی سیلیکونی
۷۹	..... نتایج آنالیز فتولومینسانس
۸۲	..... نتایج آنالیز تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM)
۸۵	..... نتایج آنالیز پراش اشعه ی ایکس (XRD)
۸۶	..... نتیجه گیری
۸۷	..... پیشنهادات جهت مطالعه و پژوهش های تکمیلی
۸۸	..... پیوست الف
۸۸	..... سنتز لایه های نازک به روش تبخیر حرارتی فیزیکی
۹۲	..... پیوست ب
۹۲	..... تعریف پدیده ی فتولومینسانس و مواد با خاصیت لومینسانس

فهرست اشکال

۳	..... شکل ۱-۱ نمونه ای از کلکتور خورشیدی [۴]
۴	..... شکل ۲-۱ یک پیوندگاه p-n با نوار های ظرفیت و رسانش [۵]

- شکل ۱-۳ میزان انرژی تولیدی سالانه، توسط فناوری فتوولتائیک بر حسب گیگاوات تا سال ۲۰۲۰
- [۷]..... ۶
- شکل ۱-۴ چند نمونه از کاربردهای سلول خورشیدی..... ۷
- شکل ۱-۵ انواع نسل های سلول خورشیدی [۹]..... ۸
- شکل ۱-۶ چند نمونه از سلولهای خورشیدی تک بلوری [۱۲]..... ۱۰
- شکل ۱-۷ چند نمونه از سلولهای خورشیدی بس بلوری [۱۲]..... ۱۰
- شکل ۱-۸ نمونه ای از سلولهای سیلیکونی لایه نازک بیشکل [۱۲]..... ۱۲
- شکل ۱-۹ ساختار سلول خورشیدی سیلیکونی بیشکل [۱۷]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۰ ساختار سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید [۱۷]..... ۱۴
- شکل ۱-۱۱ ساختار سلول های خورشیدی CIGS [۱۷]..... ۱۵
- شکل ۱-۱۲ نمونه ای از سلول خورشیدی CIGS [۲۳]..... ۱۵
- شکل ۱-۱۳ طرحی از یک سلول رنگدانه ای و فرایند های آن (ذرات اکسید تیتانیوم با رنگدانه ها
احاطه شده اند) [۳۰]..... ۱۸
- شکل ۱-۱۴ طرح سلول خورشیدی متمرکز کننده [۹]..... ۱۹
- شکل ۲-۱ طرحی از تابش مستقیم و غیر مستقیم خورشید [۳۴]..... ۲۶
- شکل ۲-۲ طرحی از روش تعیین جرم هوا توسط سایه ی یک ستون [۳۴]..... ۲۷
- شکل ۲-۳ نمودار جریان-ولتاژ سلول و نمایش جریان اتصال کوتاه روی آن [۳۴]..... ۲۸
- شکل ۲-۴ نمودار جریان-ولتاژ سلول و نمایش ولتاژ مدار باز روی آن [۳۴]..... ۲۹
- شکل ۲-۵ نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی و نمایش ضریب انباشت روی آن [۳۴]..... ۳۰
- شکل ۲-۶ نمایی از سلول خورشیدی سیلیکونی و لایه های آن [۲۳]..... ۳۲
- شکل ۲-۷ مقطع سلول خورشیدی سیلیکونی [۲]..... ۳۳
- شکل ۳-۱ طرح شماتیک سلول خورشیدی با لایه ی مبدل طیف شیشه ی ژرمانات [۵۰]..... ۳۸

- شکل ۳-۲ طرح شماتیک سلول دارای بافت سطحی که با ذرات Yb^{3+} : $\text{BaGd}_2(\text{MoO}_4)_4$ پوشانده شده است [۵۴]..... ۳۹
- شکل ۳-۳ منحنی عبور اپتیکی لایه ی اکسید روی ، لایه نشانی شده روی سلول خورشیدی ۴۱
- شکل ۳-۴ منحنی بازتاب از سطح سلول خورشیدی سیلیکونی میکرو بلوری لایه ی نازک بدون پوشش کاهنده ی بازتاب اکسید روی و با ۸۰ نانومتر پوشش کاهنده ی بازتاب اکسید روی ۴۲
- شکل ۳-۵ (a) طیف برانگیزش فتولومینسانس فسفر قرمز بیشکل حجمی، لومینسانس در انرژی ۱,۶۵ الکترون ولت (خط صلب) و ۱,۳۷۵ الکترون ولت (خط نقطه ای) (b) طیف برانگیزش فتولومینسانس بخشی از تراز فتولومینسانس با انرژی کمتر از ۱,۱۳ الکترون ولت (خط صلب) و ۰,۶۷ الکترون ولت (خط نقطه ای)..... ۴۳
- شکل ۳-۶ منحنی توزیع طیفی شدت نور خورشید و منحنی عکس العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی در طول موج های مختلف ۴۵
- شکل ۴-۱ نمودار عکس العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی برحسب طول موج تابشی [۶۳].. ۴۸
- شکل ۴-۲ سلول خورشیدی سیلیکونی دارای اتصال سیم فلزی ۵۱
- شکل ۴-۳ نمایی از سلول های آماده شده جهت قرارگیری در دستگاه ۵۱
- شکل ۴-۴ نمایی از فسفر و آلومینا روی بوته ی تنگستن ۵۲
- شکل ۴-۵ نمایی از ضخامت سنج بلور کوارتز دستگاه ۵۳
- شکل ۴-۶ نمایی از دستگاه لایه نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی ۵۳
- شکل ۴-۷ نمایی از دستگاه پاورمتر مورد استفاده ۵۴
- شکل ۴-۸ (الف) نمایی از صفحه ی تنظیمات طیف تابشی دستگاه شبیه ساز خورشید ۵۵
- شکل ۴-۸ (ب) نمایی از دستگاه شبیه ساز خورشید و I-V curve همراه آن ۵۵
- شکل ۴-۹ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول اولیه (w) و سلول (w11) و سلول نهایی (w14)..... ۵۸
- شکل ۴-۱۰ نمودار بازده سلول w برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر روی آن ۵۹

- شکل ۴-۱۱ نمودار بازتاب سطح سلول w قبل و بعد از لایه نشانی ۶۰
- شکل ۴-۱۲ نمودار طیف عبوری لایه های فسفر 9-14com ۶۱
- شکل ۴-۱۳ طیف جذبی لایه های فسفر 9-14com ۶۲
- شکل ۴-۱۴ طیف بازتابی لایه های فسفر 9-14com ۶۳
- شکل ۴-۱۵ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول e ۶۵
- شکل ۴-۱۶ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول s ۶۵
- شکل ۴-۱۷ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول c ۶۶
- شکل ۴-۱۸ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول g ۶۶
- شکل ۴-۱۹ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول e ۶۷
- شکل ۴-۲۰ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول s ۶۸
- شکل ۴-۲۱ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول c ۶۸
- شکل ۴-۲۲ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول g ۶۹
- شکل ۴-۲۳ نمودار بازتاب سطح سلول e ۶۹
- شکل ۴-۲۴ نمودار بازتاب سطح سلول s ۷۰
- شکل ۴-۲۵ نمودار بازتاب سطح سلول c ۷۰
- شکل ۴-۲۶ نمودار بازتاب سطح سلول g ۷۱
- شکل ۴-۲۷ نمودار میزان عبور لایه های فسفر با ضخامت های مختلف ۷۲
- شکل ۴-۲۸ نمودار میزان جذب لایه های فسفر با ضخامت های مختلف ۷۳
- شکل ۴-۲۹ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول ac ۷۴
- شکل ۴-۳۰ نمودار بازتاب سطح سلول ac ۷۵
- شکل ۴-۳۱ نمودار بازده سلول ac برحسب لایه های روی آن ۷۶

- شکل ۴-۳۲ نموداری از بازتاب سطحی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف ۷۷
- شکل ۴-۳۳ نموداری از عبور اپتیکی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف ۷۷
- شکل ۴-۳۴ نموداری از جذب اپتیکی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف ۷۸
- شکل ۴-۳۵ طیف فتولومینسانس لایه ی ۲۷ و زیرلایه ی بدون لایه نشانی ۸۰
- شکل ۴-۳۶ طیف فتولومینسانس لایه ی ۲۷ و زیرلایه ی بدون لایه نشانی در مقیاس متفاوت ۸۰
- شکل ۴-۳۷ طیف فتولومینسانس لایه ی ۱۷ و زیرلایه ی بدون لایه نشانی ۸۱
- شکل ۴-۳۸ طیف فتولومینسانس فسفر قرمز بیشکل حجمی که با چهار طول موج برانگیزش متفاوت تهیه شده است. سطوح شدت صفر با خطوط افقی در سمت راست شکل نشان داده شده است [۱]. ۸۲
- شکل ۴-۳۹ تصویر SEM از سطح نمونه های، لامل شماره ۱۲ حاوی فسفر با ضخامت ۲۱ نانومتر (a,b)، لامل شماره ۱۳ حاوی فسفر با ضخامت ۴۱ نانومتر (c,d) ۸۳
- شکل ۴-۴۰ تصویر SEM از سطح سلول r که روی سطح آن فسفر با ضخامت ۸۲ نانومتر لایه نشانی شده است (e,f) ۸۴
- شکل ۴-۴۱ نتیجه ی آنالیز پراش اشعه ی ایکس (XRD) لایه ی فسفر با ضخامت ۸۴ نانومتر ۸۵
- شکل ۱- پیوست الف طرحی از مراحل تشکیل لایه ی نازک در روش تبخیر حرارتی فیزیکی [۶۸] .. ۸۹
- شکل ۲- پیوست الف چند نمونه از بوتله ی مورد استفاده در روش تبخیر حرارتی فیزیکی [۶۸] ۹۰
- شکل ۳- پیوست الف طرحی از محفظه ی خلاء در روش تبخیر حرارتی فیزیکی [۷۰] ۹۱
- شکل ۱- پیوست ب (a تا c) مسیرهای بازترکیب تابشی (a) بازترکیب مستقیم (b) از تراز بخشنده به ظرفیت (c) از تراز رسانش به تراز پذیرنده (d) بازترکیب غیر تابشی با تراز میانی ۹۳

فهرست جداول

جدول ۱-۱ بهترین بازده های گزارش شده برای انواع مختلف سلول خورشیدی	۸
جدول ۲-۱ مقایسه ی انواع فناوری های سلول خورشیدی [۹].....	۲۲
ادامه ی جدول ۲-۱ مقایسه ی انواع فناوری های سلول خورشیدی	۲۳
جدول ۱-۴ مشخصات و بازده سلول w قبل و بعد از هر لایه نشانی	۵۸
جدول ۲-۴ مشخصات و بازده سلول e قبل و بعد از هر لایه نشانی	۶۳
جدول ۳-۴ مشخصات و بازده سلول c قبل و بعد از هر لایه نشانی	۶۴
جدول ۴-۴ مشخصات و بازده سلول s قبل و بعد از هر لایه نشانی	۶۴
جدول ۵-۴ مشخصات و بازده سلول g قبل و بعد از هر لایه نشانی	۶۴
جدول ۶-۴ مشخصات و بازده سلول ac قبل و بعد از هر لایه نشانی	۷۴
جدول ۷-۴ طول موج های برانگیزش و قله های گسیل متناظر آنها برای فسفر قرمز بیشکل حجمی	
.....	۸۲

فصل اول: انواع نسل های سلول خورشیدی و پدیده ی

فتوولتائیک

مقدمه:

انسان برای ادامه‌ی حیات به انرژی نیاز دارد. علاوه بر انرژی غذایی مورد نیاز بدن (۱۰۰ وات)، حدود ۳۰ برابر این مقدار برای سایر نیازهای روزمره انرژی مصرف می‌شود. یکی از مفیدترین شکل‌های انرژی، انرژی الکتریکی است که می‌توان از آن تقریباً برای هرکاری استفاده کرد. یکی از گسترده‌ترین شکل‌های تبدیل انرژی، عمل فتوسنتز در گیاهان است که نشان می‌دهد زندگی روی زمین به خورشید وابسته است. سلول‌های خورشیدی با تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته نقشی همانند گیاهان را دارند. تامین انرژی پایدار و برای درازمدت مطمئناً باید بر پایه‌ی انرژی خورشیدی باشد، بنابراین استفاده از انرژی خورشیدی در آینده امری ضروری خواهد بود.

پایان منابع نفت و گاز تنها مشکل ما نیست چون این امر مدت‌ها بعد از طول عمر ما رخ خواهد داد، مطمئناً اگر ما ۵۰۰ سال عمر می‌داشتیم پایان منابع بیشتر حائز اهمیت بود. مشکل اصلی ما اثر مخربی است که فراورده‌های جانبی استفاده از انرژی‌های هسته‌ای و فسیلی بر محیط زیستمان دارد [۲].

تبدیل انرژی در سلول‌های خورشیدی دو مرحله دارد. مرحله‌ی اول جذب تابش خورشیدی و تولید انرژی شیمیایی است که در هر نیم رسانایی اتفاق می‌افتد. مرحله‌ی دوم تبدیل به انرژی الکتریکی از طریق تولید جریان و ولتاژ است. این مرحله نیاز به ساختارها و نیروهایی برای به حرکت درآوردن الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده توسط تابش خورشید و تولید جریان الکتریکی دارد.

ساختار سلول خورشیدی را می‌توان متشکل از یک جاذب نیم‌رسانا و دوغشای نیمه تراوا که یکی برای عبور الکترون‌ها و مسدود کردن حفره‌ها و دیگری برای عبور حفره‌ها و مسدود کردن الکترون‌ها بکار می‌رود توصیف کرد.

۱-۱ پدیده ی فتوولتائیک چیست؟

پدیده ای که با برخورد نور به یک سیستم که اصطلاحاً سیستم فتوولتائیک نام دارد الکتریسیته تولید می‌شود. طی این پدیده با برخورد نور به سطح صفحاتی که مبدل نور به الکتریسیته هستند، نور به جریان الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس الکتریسیته ی تولید شده به مصرف کننده فرستاده می‌شود. یا برای استفاده در آینده و در ساعاتی که تابش خورشید وجود ندارد، در باتری هایی ذخیره می‌شود. سلول خورشیدی یک سیستم فتوولتائیک است، بدین معنا که نور خورشید را تبدیل به الکتریسیته می‌کند.

۲-۱ روش های تبدیل نور خورشید به الکتریسیته

استفاده از سلول خورشیدی از روش های مستقیم تبدیل نور خورشید به الکتریسیته است. الکتریسیته را می‌توان به روش های غیر مستقیم نیز از نور خورشید تولید کرد مثلاً از کلکتورهای خورشیدی و با متمرکز کردن نور خورشید و گرم کردن یک مایع که در سیستم تعبیه شده است ، بدین طریق که مایع بخار شده و در ژنراتور بخار می‌توان الکتریسیته تولید کرد. نمونه ای از این کلکتور ها در شکل ۱-۱ آمده است [۳].

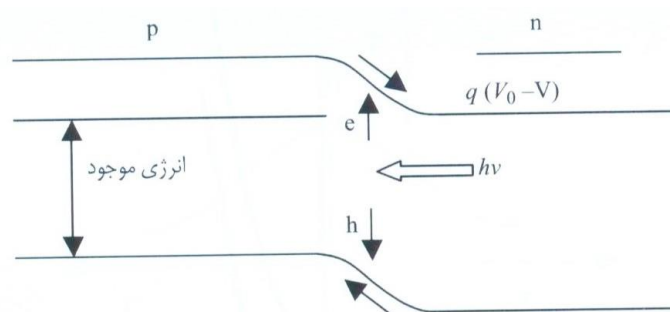


شکل ۱-۱ نمونه ای از کلکتور خورشیدی [۴]

۳-۱ مکانیزم عملکرد سلول‌های خورشیدی

بخش اصلی سلول خورشیدی، پیوندگاه نیمرساناهای نوع n و p است و عملکرد سلول را می‌توان بر اساس رفتار این پیوندگاه تحت تابش خورشید توضیح داد. نیمرساناهای نوع n و p به نیمرسانایی گفته می‌شود که در اثر آرایش با عنصر خارجی (ناخالصی) صاحب الکترون یا حفره‌ی اضافی می‌گردد. در نیمرسانای نوع n الکترون حامل اکثریت است و در نیمرسانای نوع p حفره حامل اکثریت است.

در شکل ۲-۱ یک پیوندگاه p-n با نوارهای ظرفیت و رسانش نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ یک پیوندگاه p-n با نوارهای ظرفیت و رسانش [۵]

در حالت تعادل در دو طرف پیوندگاه بارها در تعادل هستند و به عبارت دیگر پتانسیل شیمیایی در دو طرف پیوندگاه برابر است. در اثر مهاجرت الکترونهاى طرف n به سمت p به خاطر چگالی کم الکترون در سمت p، به تدریج در لبه‌ی سمت n یونهای مثبتی بر جای می‌مانند که کمبود الکترون دارند و در لبه‌ی سمت p یونهای منفی ایجاد می‌شوند که الکترون اضافه دارند و این مسئله باعث ایجاد میدان الکتریکی داخلی بین دو ناحیه می‌شود که از مهاجرت بیشتر بارها جلوگیری می‌کند، همچنین با مهاجرت حامل‌ها در پیوندگاه دو ناحیه، ناحیه‌ای خالی از بار بر جای می‌ماند که اصطلاحاً ناحیه‌ی تهی نامیده می‌شود. با تابش نور خورشید زوج‌های الکترون و حفره (اکسیتون) در داخل نیمرسانا ایجاد می‌شوند و این زوج‌ها توسط میدان الکتریکی داخلی پیوندگاه جدا می‌شوند و بعد از تفکیک به سمت دیگر ناحیه رانده می‌شوند و همانند حامل‌های اکثریت وارد نواحی n و p می‌شوند و سپس توسط جمع‌کننده‌های جریان جمع‌آوری می‌شوند و از طریق مدار خارجی قابل استخراج هستند [۵].

۴-۱ مزایای استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک

۱. فناوری فتوولتائیک اجزای متحرک ندارد و نیاز به نگهداری کمی دارد.
۲. به سوخت نیازی ندارد.
۳. نصب سیستم فتوولتائیک نسبتاً آسان و سریع است، بخصوص سیستم‌های متصل به شبکه.
۴. اجزاء مورد استفاده در سیستم‌های فتوولتائیک طی استفاده‌های طولانی مدت، قابل اطمینان هستند.
۵. به اشعه ماوراء بنفش و آب و هوا و دمای بالا مقاوم هستند.
۶. به شکل ماژولی هستند و سیستم‌ها می‌توانند در هر اندازه‌ای وجود داشته باشند.
۷. سیستم فتوولتائیک می‌تواند انرژی را تقریباً در هر نقطه از کره‌ی زمین تأمین کند.
۸. سیستم فتوولتائیک تشعشعات گاز گلخانه‌ای و دی‌اکسید کربن را کم می‌کند.
۹. سیستم فتوولتائیک به طور کلی آلودگی را کاهش می‌دهد.
۱۰. سیستم فتوولتائیک به حفاظت از منابع کمیاب و تجدید ناپذیر کمک می‌کند.
۱۱. فتوولتائیک تقریباً در هر جایی، یک بازار به سرعت در حال رشد است که تجارتهای مختلف دیگر می‌توانند خود را در گوشه‌ای از آن جای دهند.
۱۲. عمر مفید بالایی دارد (بیش از ۲۰ سال) [۶]

۵-۱ معایب استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک

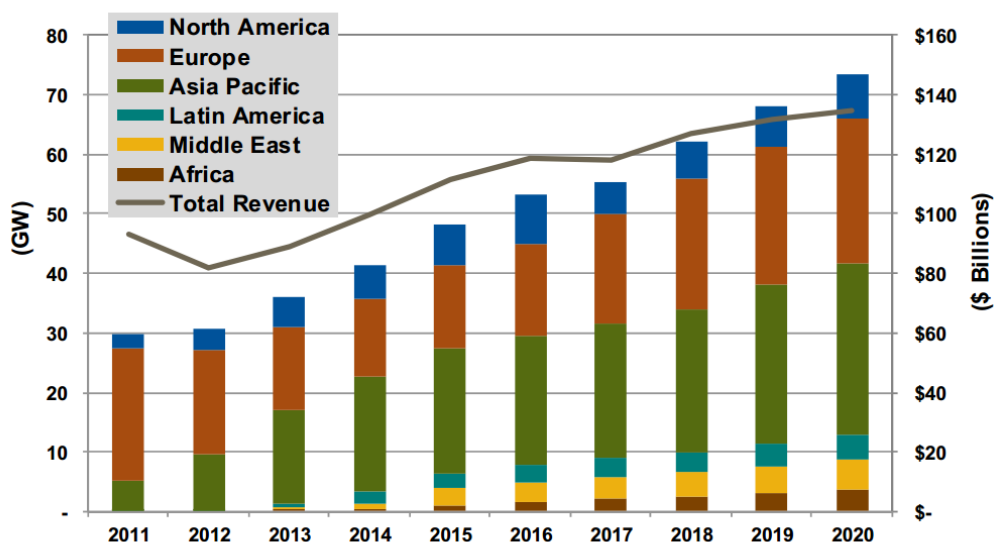
۱. هزینه تولید برق توسط سلول‌های فتوولتائیک بیشتر از هزینه تولیدی برق حاصل از سوخت‌های فسیلی می‌باشد.

۲. برق تولیدی از انرژی خورشیدی همواره در دسترس نمی‌باشد و میزان تولید به شرایطی مثل حالت وضعی خورشید، شرایط جوی، ابری بودن و ... بستگی دارد.

۳. برای استفاده از انرژی خورشیدی در شب باید از باتری برای ذخیره کردن انرژی استفاده کرد.

۴. برای مصارف زیاد الکتریسیته، نیاز به مساحت زیادی برای نصب سلول‌های فتوولتائیک می‌باشد.

مشکل بزرگی که از گسترش استفاده از سلول‌های خورشیدی جلوگیری کرده است هزینه‌ی تمام شده‌ی این فناوری نسبت به استفاده از سایر منابع انرژی مثل سوخت فسیلی و هسته‌ای است. البته طبق پیش‌بینی‌های دانشمندان این انرژی در آینده توانایی رقابت با سوخت فسیلی را بدست خواهد آورد و دانشمندان در تلاشند تا نسبت هزینه‌ی تمام شده به بازده این سلول‌ها را کاهش دهند. در شکل ۳-۱ نموداری از میزان انرژی تولیدی سالانه، توسط فناوری فتوولتائیک بر حسب گیگاوات تا سال ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱ میزان انرژی تولیدی سالانه، توسط فناوری فتوولتائیک بر حسب گیگاوات تا سال ۲۰۲۰ [۷]

۶-۱ کاربردهای سلول خورشیدی

تامین نیروی حرکتی ماهواره ها و سفینه های فضایی، تامین انرژی لازم دستگاههایی که نیاز به ولتاژهای کمتری دارند مثل ماشین حساب و ساعت، تهیه برق شهر توسط نیروگاههای فتوولتائیک، تامین نیروی لازم برای حرکت خودروها و قایقهای کوچک و... چند نمونه از کاربردهای سلول های خورشیدی هستند، در شکل ۴-۱ چند نمونه از کاربردهای سلول خورشیدی آمده است.



شکل ۴-۱ چند نمونه از کاربردهای سلول خورشیدی

۷-۱ انواع نسل های سلول خورشیدی

در شکل ۵-۱ انواع نسل های سلول خورشیدی که براساس پیدایش زمانی مرتب شده اند، نشان داده شده است.

در جدول ۱-۱ بهترین بازده های گزارش شده برای انواع مختلف سلول خورشیدی آمده است [۸].

انواع نسل های سلول خورشیدی		
نسل سوم: فناوری نو ظهور	نسل دوم: لایه نازک	نسل اول: سیلیکونی بر پایه ی ویفر
سلول خورشیدی بر پایه ی نانو بلور	سلول خورشیدی سیلیکونی بی شکل لایه نازک	سیلیکونی تک بلوری
سلول خورشیدی بر پایه ی پلیمر	سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید لایه نازک	سیلیکونی بس بلوری
سلول خورشیدی بر پایه ی پروسکایت		
سلول خورشیدی رنگدانه ای		
سلول خورشیدی متمرکز کننده		

شکل ۱-۵ انواع نسل های سلول خورشیدی [۹]

جدول ۱-۱ بهترین بازده های گزارش شده برای انواع مختلف سلول خورشیدی

نوع سلول خورشیدی	بازده	آزمایشگاه/ موسسه
سیلیکونی بلوری	24.7	University of New south Wales
سیلیکونی بس بلور	20.3	Fraunhofer institute of solar energy system
سیلیکونی بی شکل	10.1	Kaneka
HIT	23	Sanyo Corporation
GaAs	26.1	Radboud University Nijmegen
InP	21.9	Spire Corporation
چند پیوندگاهی	40.8	National Renewable Energy Laboratory
CdTe	16.5	National Renewable Energy Laboratory
CIGS	19.9	National Renewable Energy Laboratory
CuInS ₂	12.5	Hahn Meitner Institute
رنگدانه ای	11.1	Sharp
ارگانیک	6.1	Gwangju Institute of Science and Technology

۱-۷-۱ سلول های خورشیدی نسل اول

نسل اول شامل سلولهای خورشیدی تک بلوری^۱ و بس بلوری^۲ می باشد. این دسته از سلولها اولین و رایج ترین دسته از سلولهای خورشیدی می باشند که از بازده ی بالایی نیز برخوردار هستند. سلولهای سیلیکونی روی ویفر سیلیکون ساخته می شوند و سپس سلولهای ساخته شده در شبکه هایی به همدیگر متصل می شوند و ماژول های خورشیدی را تشکیل می دهند که توانایی تولید توان های بالا را دارند. تفاوت دو نوع سلول در نوع بلوری بودنشان هست، اگر سلول تماما از یک بلور سیلیکون تشکیل شده باشد به آن تک بلور می گویند و اگر سلول بس بلوری باشد، از ناحیه های بلوری متعددی در کنار هم تشکیل شده است که با مرزهایی از هم متمایز هستند.

با توجه به جدول ۱-۱، تک بلوری ها بازده ی بیشتری نسبت به بس بلوری ها دارا هستند. اما فرایند ساخت بس بلوری ها راحت تر است که باعث می شود ارزان تر باشند [۸].

در شکل ۱-۶ و ۱-۷ چند نمونه از سلولهای خورشیدی تک بلوری و بس بلوری آمده است.

بلورهای سیلیکون تحت فرایندی به نام فرایند چوکراسکی^۳ تولید می شوند [۱۰، ۱۱]، به گونه ای که پس از تولید شمش سیلیکون تحت فرایند فوق، شمش برش زده می شد و ویفرهای بلوری سیلیکون بدست می آید. بازده سلول های سیلیکونی تک بلوری در محدوده ی ۱۷ تا ۱۸ درصد قرار می گیرد.

[۹]

^۱ Monocrystal

^۲ Polycrystal

^۳ Czochralski



پنل خورشیدی



سلول خورشیدی

شکل ۶-۱ چند نمونه از سلولهای خورشیدی تک بلوری [۱۲]

فرایند ساخت سلولهای سیلیکونی بس بلوری اقتصادی تر است. این دسته از سلولها در سال ۲۰۰۸ به طور تخمینی، بالغ بر ۴۸ درصد تولیدات سلول خورشیدی را به خود اختصاص داده اند [۱۳]، بازده آنها بین ۱۲ تا ۱۴ درصد قرار می گیرد که بازده پایینی است [۹، ۱۴].



پنل خورشیدی



سلول خورشیدی

شکل ۷-۱ چند نمونه از سلولهای خورشیدی بس بلوری [۱۲]

۱-۷-۲ سلولهای خورشیدی نسل دوم

سلولهای خورشیدی نسل دوم که سلولهای خورشیدی لایه نازک نامیده می شوند، عبارتند از سلولهای خورشیدی لایه ی نازک سیلیکونی بی شکل^۴، سلولهای خورشیدی کادمیوم تلوراید ، سلولهای خورشیدی^۵ CIGS

بر خلاف سلول های نسل اول که به دلیل محدودیت اندازه ی ویفر سیلیکون، محدودیت ابعاد دارند ، سلولهای نسل دوم این محدودیت را ندارند و می توان آنها را در ابعاد بزرگ تهیه کرد. این دسته از سلولها نسبت به سلولهای نسل قبل ارزان تر هستند اما با توجه به جدول ۱-۱ بازده این سلولها در برابر نسل قبل کمتر است.

سلولهای خورشیدی نسل دوم نسبت به سلولهای نسل اول تولیدشان اقتصادی تر است. ضخامت لایه ی جاذب نور در سلولهای خورشیدی سیلیکونی مبتنی بر ویفر سیلیکون به ۳۵۰ میکرومتر می رسد. در حالی که سلولهای خورشیدی لایه ی نازک، لایه ی جاذب نور بسیار نازکی دارند که معمولا ضخامت آن از مرتبه ی میکرومتر است [۹، ۱۵]. همچنین اکثر سلولهای لایه ی نازک انعطاف پذیرند و این کاربرد آنها را مخصوصا در سطوح منحنی و سیستم های مجتمع ساختمانی بیشتر می کند.

اما از معایب آن می توان به این موارد اشاره کرد که بازده پایین آنها باعث می شود که نیاز به سطح بیشتری از این سلولها در مقایسه با نسل قبل برای تامین توان خروجی یکسان می باشد، و هزینه های نصب به دلیل اینکه نیاز به پنل های خورشیدی بیشتری داریم، بالاتر می رود. قیمت سیلیکون رو به کاهش است و این باعث می شود در آینده، سلول های خورشیدی بر پایه ی سیلیکون (تک بلور و بس بلور) تولیدشان از نظر اقتصادی به صرفه تر باشد.

^۴ Amorphous

^۵ Copper Indium Gallium Selenide

۱-۲-۷-۱ سلولهای سیلیکونی بی شکل

سلولهای سیلیکونی بی شکل اولین سلولهای خورشیدی هستند که به طور صنعتی ساخته شدند. این سلولها در فرایند دمایی پایین قابل تولید هستند و به همین دلیل زیرلایه هایی ارزان قیمت از نوع پلیمر یا زیرلایه های انعطاف پذیر دیگر در آن قابل استفاده هستند. فرایند ساخت این زیر لایه ها نیاز به انرژی کمی دارد [۱۶]، به همین دلیل نسبتا ارزان تر هستند و به گستردگی در دسترس اند. لغت بی شکل به معنی عدم وجود نظم ساختاری در سیلیکون می باشد. نکته ی مهم در مورد این سلولها بازده ی کم و ناپایدار آنها می باشد که بین ۴ تا ۸ درصد متغیر است. همچنین به خوبی در دماهای بالا قابل بکارگیری هستند [۹].



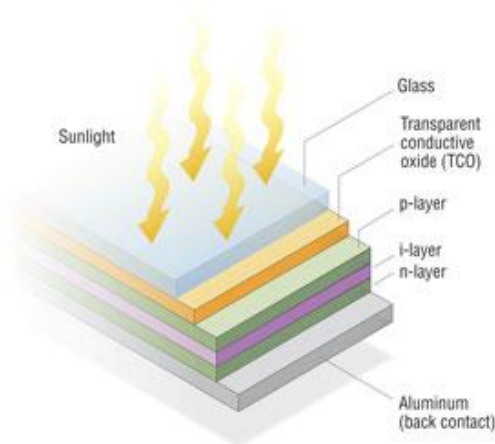
پنل خورشیدی



سلول خورشیدی

شکل ۸-۱ نمونه ای از سلولهای سیلیکونی لایه نازک بی شکل [۱۲]

در شکل ۹-۱ ساختار سلول خورشیدی سیلیکونی بی شکل آمده است که به ترتیب شامل شیشه ی روی سلول، اکسید رسانای شفاف، لایه ی سیلیکون نوع p، لایه ی سیلیکون ذاتی (i)، لایه ی سیلیکون نوع n و اتصال فلزی پشت سلول است.

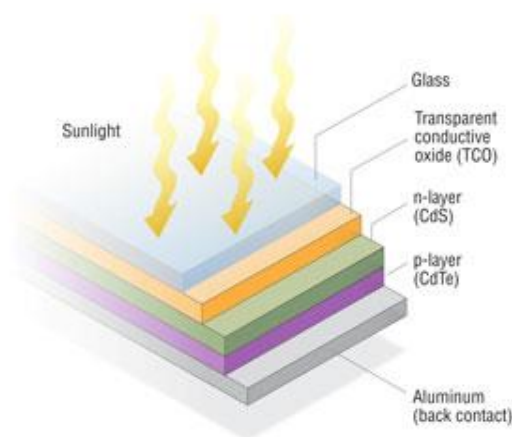


شکل ۱-۹ ساختار سلول خورشیدی سیلیکونی بی شکل [۱۷]

۱-۲-۲-۷ سلولهای خورشیدی کادمیم تلورايد

در میان سلولهای خورشیدی لایه نازک سلولهای کادمیم تلورايد یکی از پیشگامان توسعه سیستم های فتوولتائیک ارزانتر و از نظر اقتصادی قابل رشد است [۱۸, ۱۹]. کادمیم تلورايد گاف نواری تقریباً 1.5 eV دارد، همچنین ضریب جذب نوری بالا و پایداری شیمیایی خوبی دارد. این ویژگی ها آن را جذاب ترین ماده برای ساخت سلول خورشیدی لایه نازک ساخته است. کادمیم تلورايد یک نیم رسانای با ترکیب بلوری و گاف نواری مستقیم عالی است که جذب نور را راحت تر می کند و بازده را بالا می برد. بازده این سلولها معمولاً در بازه ۹ تا ۱۱ درصد قرار می گیرد [۲۰]، این سلول ها را می توان بر روی زیرلایه های پلیمری و انعطاف پذیر ساخت.

از معایب بزرگ سلول های کادمیوم تلورايد می توان فلز کادمیم را عنوان کرد، که فلزی سنگین و سرطان زا است و می تواند در بافت گیاهان و انسان و سایر موجودات زنده ذخیره شود. معدوم کردن مواد بر پایه ی کادمیم همچنین بازیافت آنها می تواند بسیار هزینه بر باشد و برای جامعه و محیط زیست مخاطره آمیز باشد [۹, ۲۱]. در شکل ۱-۱۰ ساختار سلول خورشیدی کادمیوم تلورايد آمده است.



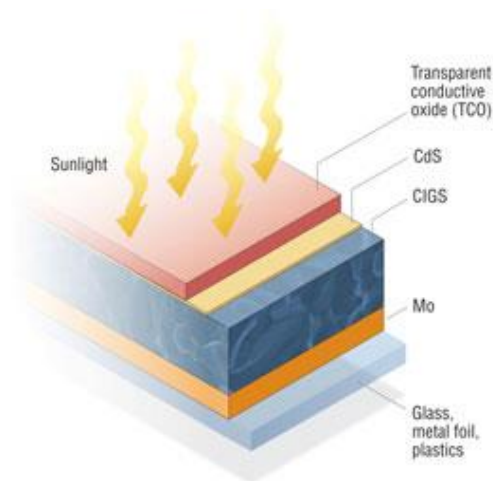
شکل ۱-۱ ساختار سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید [۱۷]

۱-۲-۷-۳ سلول های خورشیدی CIGS

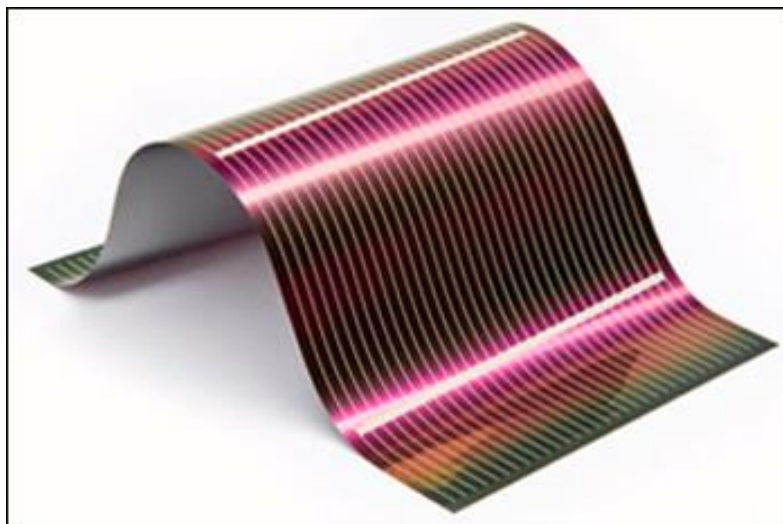
CIGS یک ترکیب نیمرسانای چهارگانه متشکل از چهار عنصر مس، ایندیم، گالیم و سلنیوم است [۲۱]. CIGS همچنین نیمرساناهای با گاف انرژی مستقیم است و در مقایسه با سلولهای کادمیوم تلوراید بازده بیشتری دارد که در محدوده ی ۱۰ تا ۱۲ درصد است [۱۰، ۲۲]. زیرلایه ی CIGS می تواند از صفحات شیشه ای، زیرلایه ی پلیمری، استیل، آلومینیم و... انتخاب شود. مزیت سلولهای CIGS عمر طولانی، بدون افت قابل ملاحظه ی آنها می باشد [۹، ۱۶، ۲۰].

اما سوال اینجاست که چه نوع سلول خورشیدی مناسب ترین است؟، برای شرایط مختلف سلول های مختلفی متناسب هستند، مثلا سلول های خورشیدی سیلیکونی تک بلوری و بس بلوری بهترین انتخاب برای اکثر مصارف خانگی هستند. اگر به دنبال یک سیستم با مقیاس بزرگ هستید و فضای مورد نیاز آن را دارید و در مکانی با دمای بالا زندگی می کنید، سلول های خورشیدی لایه نازک بهتر هستند. اگر یک گزینه ی انعطاف پذیر میخواهید سلولهای سیلیکونی بی شکل و سلولهای CIGS مناسب هستند.

در شکل ۱-۱۱ ساختار سلول خورشیدی CIGS آمده است.



شکل ۱-۱۱ ساختار سلول های خورشیدی CIGS [۱۷]



شکل ۱-۱۲ نمونه ای از سلول خورشیدی CIGS [۲۳]

۳-۷-۱ سلولهای خورشیدی نسل سوم

سلولهای خورشیدی نسل سوم شامل الف-سلولهای خورشیدی با پایه ی نانو بلوری، سلولهای خورشیدی با پایه ی پلیمری، سلولهای خورشیدی رنگدانه ای، سلولهای خورشیدی متمرکز کننده و سلول های خورشیدی بر پایه ی پروسکایت هستند.

۱-۳-۷-۱ سلولهای خورشیدی نانو بلوری

این سلولها عموماً به نام سلولهای خورشیدی نقاط کوانتومی^۷ شناخته شده اند. نقاط کوانتومی نامی است که مربوط به اندازه ی بلور می شود که معمولاً ابعادی در محدوده ی چند نانومتر دارد، مثلاً موادی مثل سیلیکون متخلخل یا اکسید تیتانیوم متخلخل به وفور در نقاط کوانتومی استفاده می شوند [۲۴]، بازده این سلولها در محدوده ی ۷ تا ۸ درصد قرار می گیرد [۹].

۱-۳-۷-۲ سلولهای خورشیدی پلیمری

سلولهای خورشیدی پلیمری عموماً به خاطر زیرلایه ی پلیمری که دارند انعطاف پذیرند. اولین سلولهای خورشیدی پلیمری توسط تانگ و همکارانش در آزمایشگاه تحقیقاتی کداک^۸ اختراع شد [۸]، بازده این سلولها تقریباً در محدوده ی ۳ تا ۱۰ درصد قرار می گیرد [۹].

۱-۳-۷-۳ سلولهای خورشیدی رنگدانه ای

آخرین تحقیقات بر روی افزایش بازده سلولهای خورشیدی توسط دستکاری مولکولی و استفاده از نانو تکنولوژی برای بهره گیری از انرژی نور متمرکز شده است [۲۵, ۲۶]. اولین سلول خورشیدی رنگدانه ای توسط مایکل گراتزل در انستیتو صنعتی فدرال سویس معرفی شد [۱۰, ۲۱]. سلولهای خورشیدی رنگدانه ای عموماً از مولکولهای رنگ بین الکترودهای متفاوت تشکیل شده اند.

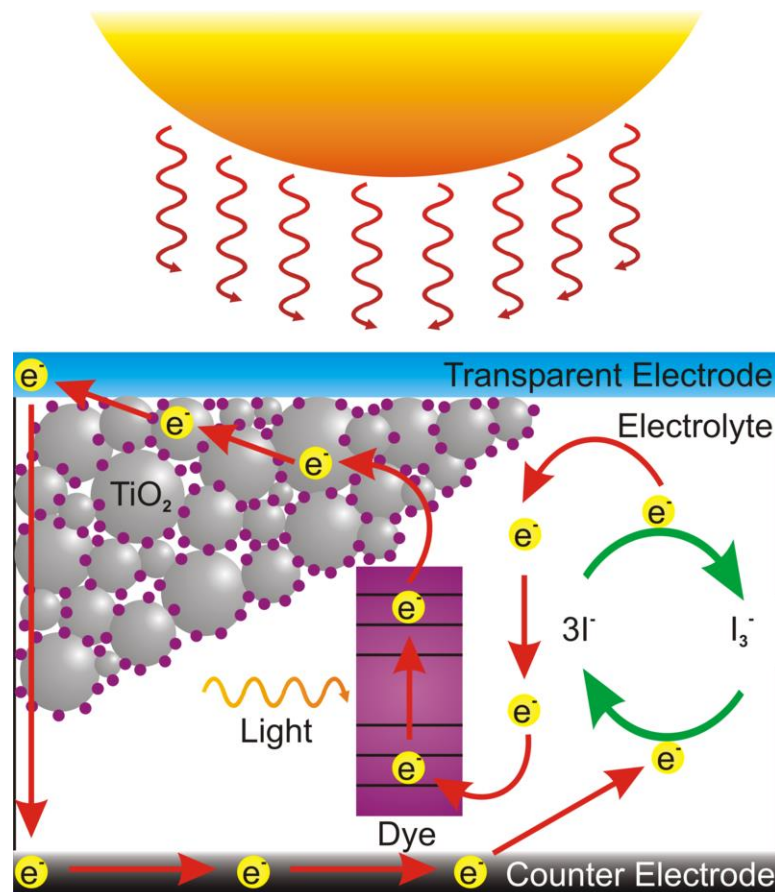
سلولهای خورشیدی رنگدانه ای از چهار مولفه تشکیل می شوند: الکتروود نیم رسانا (اکسید تیتانیوم نوع n و NiO نوع p، رنگ حساس کننده، مبادله کننده ریداکس، و الکتروود شمارنده (کربن یا پلاتین) [۲۷]، چالش های مهمی در مورد این نوع از سلولها وجود دارد، مثلاً افت عملکرد مولکولهای رنگ و در نتیجه ایجاد مشکل در پایداری سلول [۲۱]، مولکولهای رنگ معمولاً در برابر تابش فرابنفش و مادون قرمز خاصیتشان افول می کند و این منجر به کاهش عمر و کاهش پایداری سلول می شود [۹]. علی رغم

Quantum Dot ^۷
Tang et al. at Kodak Research Lab ^۸

بازده کم این دسته از سلولها، هزینه ی ساخت آنها پایین است. همچنین روش ساخت نسبتاً ساده ای نیز نسبت به سایر فناوری های سلول های خورشیدی دارند [۸].

در تمام سیستم های فتوولتائیک دو مرحله ی اساسی برای تبدیل نور خورشید به الکتریسیته وجود دارد. ۱- جذب نور با تحریک الکترون ۲- جدایی حامل های بار، این دو فرایند در سلولهای خورشیدی رنگدانه ای با سلولهای مبتنی بر پیوندگاه p-n کاملاً متفاوت است. در سلولهای مبتنی بر پیوندگاه p-n فرایند جذب نور و تولید حامل های بار توسط مواد نیم رسانا انجام می شود، و میدان داخلی پیوندگاه حاملهای بار را جدا می کند. در سلولهای رنگدانه ای تولید الکترون در رنگدانه انجام می شود و جدایش بار در محل اتصال بین اکسید فلزی و رنگ روی می دهد.

رنگدانه در این سلولها به عنوان حساس کننده ی نوری به کار می رود که روی سطح اکسید فلزی به صورت متصل کننده عمل می کند. با تابش نور خورشید رنگدانه نور را جذب می کند و فتوالکترون های برانگیخته تولید می شود، و این فتوالکترون ها به نوار رسانش اکسید نیم رسانای فلزی تزریق می گردند [۲۸]. الکترولیت در این سلولها هم منتقل کننده ی الکترون است و هم نقش احیای رنگ اکسید شده را بر عهده دارد. الکترولیت ها به سه دسته ی مایع ، شبه جامد ، و جامد تقسیم می شوند [۲۹]. در شکل ۱-۱۳ طرحی از یک سلول رنگدانه ای و فرایند های آن آمده است.

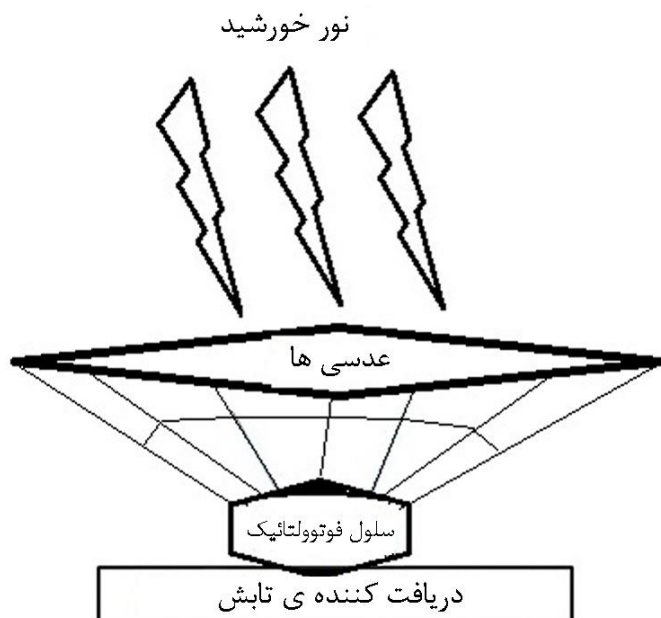


شکل ۱۳-۱ طرحی از یک سلول رنگدانه ای و فرایندهای آن (ذرات اکسید تیتانیوم با رنگدانه‌ها احاطه شده‌اند) [۳۰]

۱-۷-۳-۴ سلولهای خورشیدی متمرکز کننده

سلول‌های خورشیدی متمرکز کننده از سال ۱۹۷۰ ظاهر شدند [۲۶، ۳۱]. این سلولها جز جدیدترین فناوری‌ها در تحقیقات و توسعه‌ی سلول خورشیدی می‌باشند. قاعده‌ی کلی این سلولها این است که مقدار زیادی از انرژی خورشید را در ناحیه‌ی کوچکی روی سلول خورشیدی جمع کنند، همان‌گونه که در شکل ۱۴-۱ نشان داده شده است. اصول این تکنولوژی بر اساس اپتیک بنا نهاده شده است، با استفاده از آینه‌های بزرگ و آرایشی از عدسی‌ها، پرتوهای خورشید بر روی ناحیه‌ی کوچکی از سلول خورشیدی متمرکز می‌شوند. تمرکز پرتوهای خورشید در یک نقطه مقدار زیادی انرژی گرمایی در آن نقطه بدست می‌دهد. انرژی گرمایی حاصل یک موتور گرمایی را به کار می‌اندازد که به یک ژنراتور برق متصل است و در نتیجه الکتریسیته تولید می‌شود [۳۲].

این سلولها بسته به توان سیستم عدسی ها به سه دسته ی سلولهای کم، متوسط و زیاد متمرکز کننده تقسیم می شوند. سلولهای متمرکز کننده مزیت های فراوانی دارند که از جمله می توان بازده بالای ۴۰ درصد، عدم وجود قسمت های متحرک، زمان واکنش سریع را نام برد [۹].



شکل ۱-۱۴ طرح سلول خورشیدی متمرکز کننده [۹]

۴-۷-۱ سلولهای خورشیدی بر پایه ی پروسکایت

پروسکایت ها دسته ای از ترکیبات هستن که با فرمول ABX_3 مشخص می شوند، که در این فرمول یک هالوژن نظیر I^- , Cl^- , Br^- است و A, B کاتیون هستند. سلولهای خورشیدی پروسکایت جزو کشفیات جدید در میان جامعه ی تحقیقاتی سلول خورشیدی است و مزایای بسیاری نسبت به سلول های خورشیدی بر پایه ی سیلیکون و سلولهای خورشیدی لایه ی نازک دارد. سلولهای خورشیدی سیلیکونی نیاز به فرایند ساخت پرهزینه و چند مرحله ای دارد و همچنین نیاز به دمای بالای ۱۰۰۰ درجه ی سانتیگراد و تجهیزات خلا دارند [۳۳]. سلولهای بر پایه ی پروسکایت می توانند به بازده بالای ۳۱ درصد

برسند. با توجه به اختراع جالبی که اخیراً ولکزواگن^۹ انجام داده است، همچنین قابل پیش بینی است که این سلولها نقش مهمی در نسل بعدی باتری های اتومبیل های الکتریکی بازی کنند. چالش مهمی که در مورد سلولهای خورشیدی پروسکایت وجود دارد مسئله ی پایداری و دوام آنهاست. مواد این سلول ها با گذشت زمان افت عملکرد پیدا می کنند و در نتیجه کاهش بازده اتفاق می افتد. تحقیقات بیشتری لازم است تا این سلولها به فروشگاه ها راه یابند [۹].

۸-۱ جمع بندی

دو چالش عمده برای رشد انرژی های تجدید پذیر در برابر سوخت های فسیلی وجود دارد:

۱- افزایش بازده تبدیل انرژی خورشیدی

۲- کاهش هزینه ی تولید سیستم های فتوولتائیک

هزینه ی تولید سلولهای نسل اول مبتنی بر سیلیکون علی رغم در دسترس بودن سیلیکون بالاست. همچنین فرایند ساخت آن پیچیده است. از دیگر موارد معایب این نسل از سلولها این است که فوتون های با انرژی بالاتر از گاف انرژی سیلیکون انرژی اضافه شان به صورت گرما هدر می رود و فوتون های با انرژی پایین تر از گاف انرژی سیلیکون جذب نمی شوند.

مزایای سلول های خورشیدی لایه نازک در زیر آمده است:

-قیمت زیرلایه ی آنها کم است.

-در شرایط خلا و غیر خلا هم می توانند کار کنند.

-قیمت کمتری نسبت به نسل اول دارند.

^۹ Volkswagen

-ضریب جذب بالایی دارند.

معایب سلول های خورشیدی لایه نازک در زیر آمده است:

-مواد به کار رفته در آنها کمیاب است.

-به خاطر مواد به کار رفته در آنها، آلودگی زیست محیطی تولید می کنند.

مزایای سلولهای خورشیدی نسل سوم:

-قیمت کم

-فرایند ساخت راحت تر از فرایند ساخت سلول های نسل های دیگر است.

-مواد اولیه ی آن ها در دسترس است.

معایب سلولهای خورشیدی نسل سوم:

-به دلیل مایع بودن الکترولیت باید دما پایین باشد.

-رنگ بر پایه ی روتنیوم و الکتروود پلاتین قیمت بالایی دارند.

در جدول ۱-۲ انواع فناوری های سلول خورشیدی از نظر بازده و عملکرد در دمای بالا و قیمت مقایسه شده اند.

جدول ۱-۲ مقایسه ی انواع فناوری های سلول خورشیدی [۹]

اطلاعات جانبی	قیمت	عملکرد در دمای بالا	بازده	نوع سلول	نسل سلول
قدیمی ترین فناوری فتولتائیک	دو برابر گران تر نسبت به سلولهای لایه نازک	در دمای بالا خوب نیست	14%-17/5%	تک بلوری	نسل اول
	دو برابر گران تر نسبت به سلولهای لایه نازک	در دمای بالا خوب نیست	12%-14%	بس بلوری	
سمی به خاطر کادمیم	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	در دمای بالا به خوبی دمای پایین کار می کند	9%-11%	CdTe	نسل دوم
	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	در دمای بالا به خوبی دمای پایین کار می کند	10%-12%	CIGS	
بعضی از این نوع سلول بازده خیلی خوب ۲۰ درصد دارند	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	در دمای بالا به خوبی دمای پایین کار می کند	4%-8%	سیلیکونی بی شکل	
زمان نصب طولانی و فضای زیاد نیاز دارد					

ادامه ی جدول ۱-۲ مقایسه ی انواع فناوری های سلول خورشیدی

اطلاعات جانبی	قیمت	عملکرد در دمای بالا	بازده	نوع سلول	نسل
					نسل سوم
زمان نصب کم و فضای زیاد نیاز دارد	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	بهترین پایداری در برابر حرارت	7%-8%	نانو بلوری	
زمان نصب کم و فضای زیاد نیاز دارد	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	در دمای بالا خوب نیست	≈10%	رنگدانه ای	
زمان نصب کم و فضای کم نیاز دارد	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	در دمای بالا خوب نیست	≈3%-10%	پلمیری	
زمان نصب طولانی و فضای زیاد نیاز دارد	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	بهترین پایداری در برابر حرارت	≈40%	متمرکز کننده	
آخرین فناوری، زمان نصب کم و کمترین فضا را نیاز دارد	۵۰ درصد ارزان تر نسبت به سلولهای سیلیکونی رایج	بهترین پایداری در برابر حرارت	31%	پروسکایت	

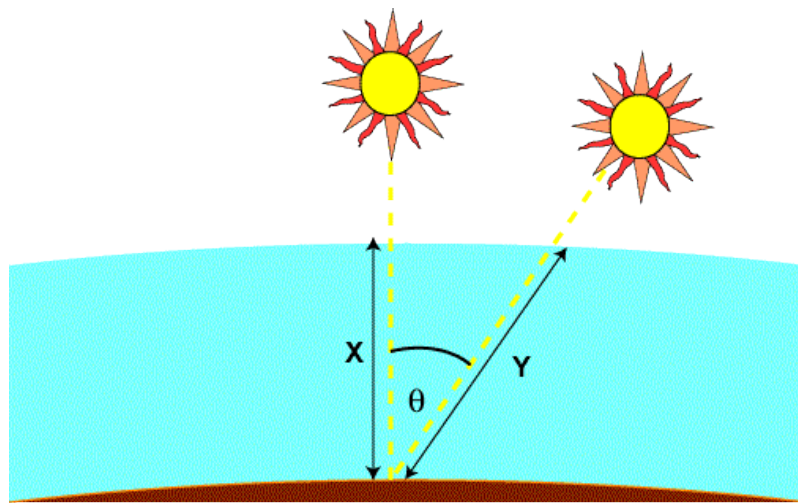
فصل دوم: مفاهیم مربوط به سیستم‌های فتوولتائیک

۱-۲ تعریف جرم هوا

جرم هوا (AM) ^{۱۰} به صورت زیر تعریف می شود.

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1-2)$$

که در آن θ زاویه ی نسبت به خط عمود بر زمین است. در شرایطی که خورشید درست بالای سر است، مقدار جرم هوا برابر ۱ است.



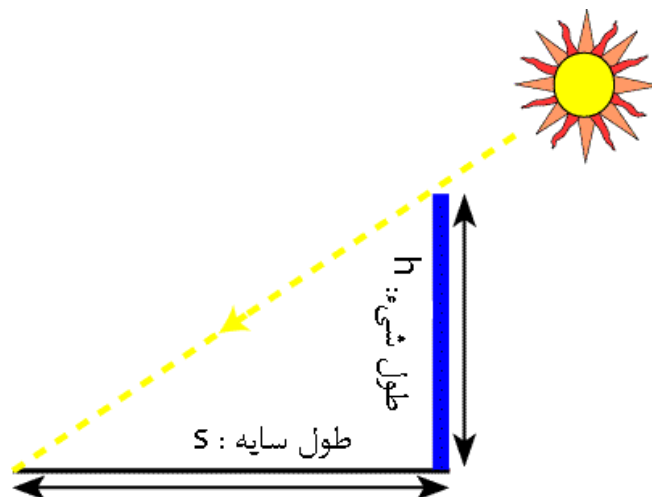
شکل ۱-۲ طرحی از تابش مستقیم و غیر مستقیم خورشید [۳۴]

یک روش آسان تعیین جرم هوا با استفاده از سایه ی یک ستون عمودی است. این روش در شکل

۲-۲ آمده است. با توجه به این شکل جرم هوا عبارت است از طول وتر مثلث قائم الزاویه تقسیم بر

ارتفاع ستون، با توجه به قاعده ی فیثاغورث داریم [۱۹].

$$AM = \frac{\sqrt{h^2 + s^2}}{h} = \sqrt{1 + \frac{s^2}{h^2}} \quad (2-2)$$



شکل ۲-۲ طرحی از روش تعیین جرم هوا توسط سایه ی یک ستون [۳۴]

۱-۱-۲ تابش و طیف خورشیدی استاندارد شده

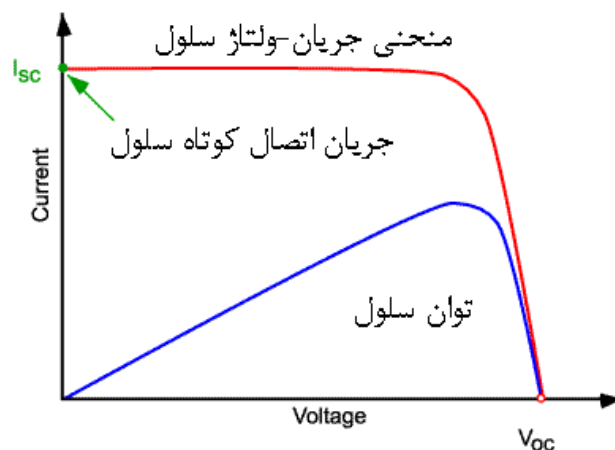
بازده سلول خورشیدی به تغییرات توان و طیف نور تابشی وابسته است. برای یک مقایسه ی دقیق بین سلولهای خورشیدی که در زمان ها و مکان های متفاوتی مورد سنجش قرار گرفته اند، یک طیف استاندارد و چگالی توان استاندارد برای خارج اتمسفر زمین و روی زمین تعریف شده است.

طیف استاندارد بیرون اتمسفر زمین AM0 نامیده می شود، چون نور از هیچ بخشی از اتمسفر عبور نکرده است. این طیف بیشتر برای پیش بینی عملکرد قابل انتظار سلول های خورشیدی در فضا استفاده می شود. طیف استاندارد در سطح زمین AM1.5G (G اشاره به جهانی^{۱۱} بودن طیف دارد و تابش مستقیم و پراکنده شده را شامل می شود.) یا AM1.5D (که فقط تابش مستقیم را شامل می شود) نامیده می شود. شدت تابش AM1.5D با کاهش چند درصد طیف AM0 (چند درصد برای جذب و چند درصد برای پراکندگی) بدست می آید. طیف جهانی، چند درصد بیشتر از طیف مستقیم است، طیف استاندارد AM1.5G را به $1 \text{ kw}/\text{m}^2$ بهنجار می کنند تا هم رند باشد و هم این واقعیت که در تابش های خورشید تغییرات ذاتی وجود دارد، در نظر گرفته شود.

^{۱۱} Global

۲-۲ جریان اتصال کوتاه

جریان اتصال کوتاه، جریانی از سلول خورشیدی است که در آن ولتاژ دو سر سلول صفر باشد (مثلا وقتی دو سر سلول اتصال کوتاه می شود). این جریان معمولا با نماد I_{sc} نوشته می شود، این جریان روی نمودار جریان-ولتاژ سلول در زیر نمایش داده شده است. در این نمودار توان سلول که حاصل ضرب جریان در ولتاژ خروجی سلول است نیز نمایش داده شده است.



شکل ۲-۳ نمودار جریان-ولتاژ سلول و نمایش جریان اتصال کوتاه روی آن [۳۴]

این جریان حاصل تولید و جمع آوری حامل های باری است که توسط نور تولید شده اند. برای یک سلول ایده آل در حالتی که کمترین اتلاف را داشته باشیم، جریان اتصال کوتاه و جریان تولید شده توسط نور یکسان هستند. بنابراین جریان اتصال کوتاه بزرگترین جریانی است که می توان از سلول بدست آورد. جریان اتصال کوتاه به پارامترهایی بستگی دارد که در زیر توصیف شده اند.

-مساحت سطح سلول: برای حذف وابستگی به مساحت سطح سلول، به طور معمول از چگالی جریان اتصال کوتاه که با نماد $J_{sc} (\frac{mA}{cm^2})$ نوشته می شود، به جای جریان اتصال کوتاه استفاده می شود.

-تعداد فوتون ها (برای مثال توان چشمه ی نور): جریان اتصال کوتاه یک سلول رابطه ی مستقیمی با شدت نور دارد.

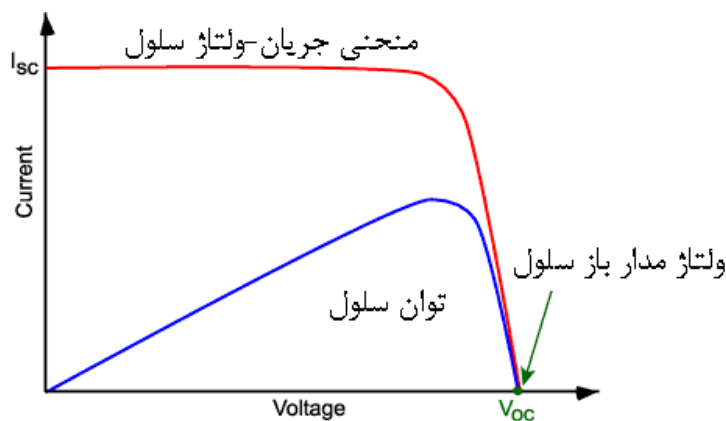
-طیف نور ورودی : برای اکثر اندازه گیری های سلول خورشیدی ، از طیف نور استاندارد AM1.5 استفاده می شود.

-خواص نوری: جذب و بازتاب سلول خورشیدی

-توانایی جمع آوری حامل ها توسط سلول خورشیدی

۲-۳ ولتاژ مدار باز

ولتاژ مدار باز که با نماد V_{oc} نمایش داده می شود، بیشترین ولتاژی است که سلول خورشیدی بدست می دهد. این ولتاژ در جریان صفر بدست می آید(زمانی که مقاومت بی نهایت به دو سر سلول وصل شود). این ولتاژ در نمودار جریان ولتاژ سلول که در زیر آمده است مشخص شده است.



شکل ۲-۴ نمودار جریان-ولتاژ سلول و نمایش ولتاژ مدار باز روی آن [۳۴]

۲-۴ ضریب انباشت سلول خورشیدی

جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز، به ترتیب بیشترین جریان و ولتاژ سلول خورشیدی هستند. با این حال در هر دوی این نقاط، توان سلول خورشیدی صفر است. ضریب انباشت^{۱۲} که با نماد FF نمایش داده می شود، پارامتری است که در کنار V_{oc} و I_{sc} ، بیشینه ی توان سلول را تعیین می کند.

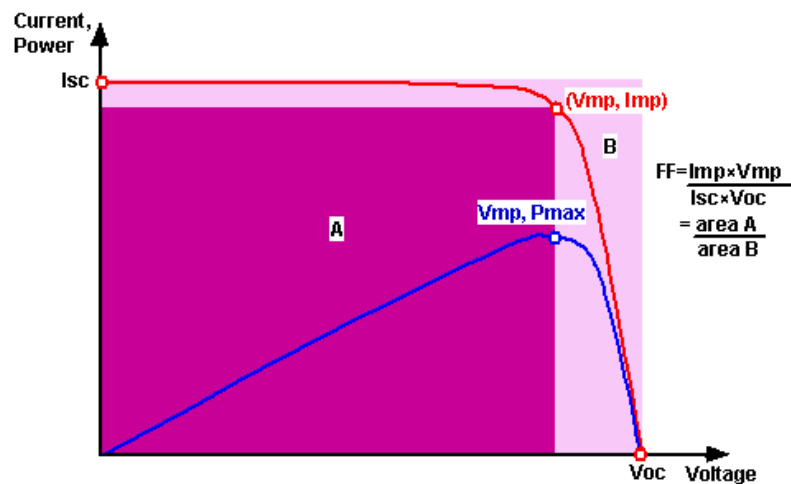
^{۱۲} Fill Factor

ضریب انباشت به صورت نسبت توان بیشینه ی سلول خورشیدی به حاصل ضرب V_{oc} در I_{sc} تعریف می شود. ضریب انباشت معیاری از چهار گوشه بودن منحنی جریان-ولتاژ سلول خورشیدی است [۱۹].

ضریب انباشت با فرمول زیر قابل محاسبه است [۳۵]:

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (۳-۲)$$

در فرمول بالا V_{mp} و I_{mp} به ترتیب جریان سلول و ولتاژ سلول در توان بیشینه ی آن هستند. ضریب انباشت در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۵ نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی و نمایش ضریب انباشت روی آن [۳۴]

۲-۵ بازده سلول خورشیدی

بازده رایج ترین پارامتری است که با استفاده از آن عملکرد یک سلول خورشیدی با دیگری مقایسه می شود. بازده به صورت نسبت انرژی خروجی سلول خورشیدی به انرژی ورودی از خورشید تعریف می شود.

علاوه بر بازتاب سطحی خود سلول، عملکرد سلول خورشیدی به نوع طیف و شدت نور خورشید ورودی و دمای سلول بستگی دارد. بنابراین برای مقایسه ی عملکرد یک سلول با دیگری، شرایطی که بازده در آن اندازه گیری می شود باید به دقت کنترل شود.

سلول های خورشیدی روی زمین تحت شرایط AM1.5 و دمای ۲۵ درجه ی سانتیگراد مورد اندازه گیری قرار می گیرند. سلول های خورشیدی که برای استفاده در فضا طراحی می شوند، تحت شرایط AM0 مورد اندازه گیری قرار می گیرند. بازده سلول خورشیدی به صورت کسری از توان ورودی که به الکتریسیته تبدیل شده است می باشد و با استفاده از فرمول ۲-۳ [۳۵] به صورت زیر تعریف می شود.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (۴-۲)$$

در رابطه ی بالا P_{in} توان ورودی به سلول خورشیدی است و مقدار آن برای محاسبه ی بازده در شرایط استاندارد AM1.5 برابر $1 \frac{kw}{m^2}$ یا $100 \frac{mw}{cm^2}$ در نظر گرفته می شود [۱۹].

بنابراین برای سلولهای مورد آزمایش در این پایان نامه که مساحت سطح سلول برابر

$$2cm \times 2cm = 4cm^2 \text{ است، مقدار توان ورودی برابر } 400mw = 4cm^2 \times 100 \frac{mw}{cm^2} \text{ است.}$$

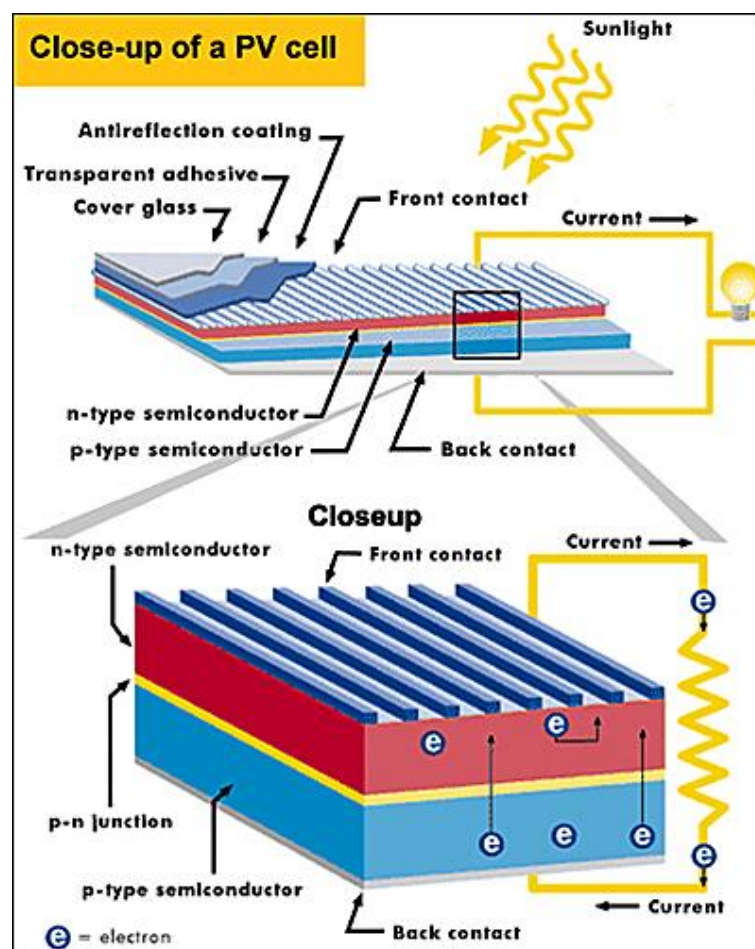
۲-۶ ساختار سلول های خورشیدی

یک سلول خورشیدی معمولاً از این موارد تشکیل می شود: یک پوشش پلاستیک یا شیشه، یک لایه ی ضد بازتاب ، یک اتصال در بالای سلول (برای اینکه الکترون ها به مدار وارد شوند)، یک اتصال در پایین سلول برای تکمیل مدار ، لایه های نیم رسانا که الکترون ها سفر خود را در آنجا شروع کرده و به پایان می برند.

یکی از مهمترین بخش های سلول خورشیدی لایه های نیم رسانا هستند. این لایه ها جایی هستند که الکترون ها آزاد می شوند و جریان الکتریکی تولید می شود. این لایه، لایه ی فعال نامیده می شود. وقتی نور به سلول وارد می شود، انرژی آن به الکترون های هر دو لایه ی n , p منتقل می شود. به خاطر بار مخالف لایه های n , p ، الکترون ها تمایل دارند که از لایه ی نوع n به لایه ی نوع p جریان یابند، اما میدان الکتریکی در محل پیوندگاه p-n مانع این اتفاق می شود. وجود یک مدار خارجی راه فراری برای الکترون های لایه ی n فراهم می کند تا به لایه ی p مهاجرت کنند. سیم های بسیار ریزی

که روی لایه ی نوع n قرار دارند، مدار خارجی مذکور را فراهم می کنند و الکترون هایی که به این مدار سرازیر می شوند جریان را می آفرینند.

چون مقدار توان تولیدی یک سلول خورشیدی تنها نسبتاً کوچک است (1-2 W)، طراحان سلول خورشیدی آنها را در گروه هایی گرد می آورند و ماژول ها (پنل ها) را می سازند که مقدار قابل توجه تری از ولتاژ، جریان و توان بدست می دهند. سلول های خورشیدی را می توان به صورت سری به هم وصل کرد تا ولتاژهای بالاتری بدست دهند. این کار با اتصال پایانه ی مثبت یک سلول خورشیدی به پایانه ی منفی یک سلول دیگر انجام می شود. این سلول ها همچنین به صورت موازی قابل اتصال هستند تا جریان بیشتری بدست دهند. این کار با اتصال پایانه ی مثبت یک سلول به پایانه ی مثبت سلول دیگر و پایانه ی منفی آن به پایانه ی منفی سلول دیگر قابل انجام است [۱۹].



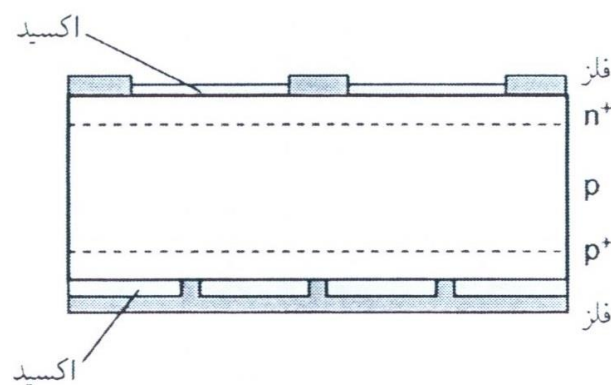
شکل ۶-۲ نمایی از سلول خورشیدی سیلیکونی و لایه های آن [۲۳]

۷-۲ سلولهای خورشیدی سیلیکونی بهینه

سیلیسیم مزایای بسیاری دارد، دومین عنصر فراوان روی زمین است و مقدار نامحدودی از آن در دسترس است، همچنین سمی نیست، اگر سیلیسیوم در معرض هوا قرار گیرد روی سطح آن لایه ای از اکسید سیلیسیوم تشکیل می شود که از آن کاملاً محافظت می کند و از خوردگی آن جلوگیری می کند.

در ساختار سلول خورشیدی معمولی اتصالات در دو سطح مقابل هم قرار می گیرند. اتصالات غیر شفاف برای سطحی که نور به آن می تابد مناسب نیستند. به این دلیل اتصالات فلزی مانند دندانهای شانه به شکل نوارهایی باریک قرار می گیرند، به گونه ای که بیشتر سطح عاری از پوشش می باشد.

بارها باید از طریق لایه ی غشایی به سمت نوارهای اتصالات فلزی موازی با سطح بروند. برای جلوگیری از تشکیل مقاومت های سری بزرگ ، باید این لایه ی غشایی آلاینش بالایی داشته باشد. در کنار این لایه ی غشایی نازک یک ناحیه ی جاذب با آلاینش کم ، قرار دارد که بزرگترین بخش از ضخامت سلول خورشیدی است. چون الکترون ها از حفره ها تحرک بیشتری دارند بنابراین در یک طول عمر مشخص طول پخش بزرگتری دارند و به این دلیل به عنوان حاملهای اقلیت انتخاب می شوند. به همین دلیل بخش میانی سلول خورشیدی که ضخامت زیادی هم دارد دارای آلاینش نوع p باید باشد و سطح بالایی سلول باید دارای آلاینش زیاد از نوع n باشد که با n^+ نمایش داده می شود و به عنوان غشای الکترونی عمل می کند. در شکل ۷-۲ مقطع سلول خورشیدی سیلیکونی نشان داده شده است.



شکل ۷-۲ مقطع سلول خورشیدی سیلیکونی [۲]

برای کاهش اتلاف الکترون ها ناشی از بازترکیب سطحی در اتصالات پشت سلول، از نیم رسانای با آلایش زیاد نوع p که با نماد p^+ نشان داده می شود، در مقابل این اتصالات استفاده می شود تا غشای حفره ای پایداری ایجاد گردد. کاهش بازترکیب در اتصالات پشت سلول معمولاً به چیزی به عنوان میدان سطحی پشت سلول نسبت داده می شود که منشاء آن بار منفی ناحیه ی با آلایش p^+ است و باعث دفع الکترون ها می گردد. پایین بودن احتمال بازترکیب از کاهش چگالی الکترونها در لایه ی p^+ ناشی می گردد. به دلیل رسانندگی بالای لایه ی p^+ در پشت سلول نیاز نیست از اتصال فلزی روی کل این سطح استفاده گردد.

برای کاهش آهنگ بازترکیب سطحی، بخشهایی از سطوح جلویی و پشتی سلول که دارای اتصالات فلزی نیستند با لایه ای غیر فعال مثل سیلیسیم دی اکسید یا سیلیسیم نیتريد پوشانده می شود [۲].

فصل سوم: مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی

افزایش بهره‌وری سلول‌های خورشیدی

۳-۱ مروری بر مقالات

در این بخش به بررسی مقالات مرتبط با افزایش بازده سلولهای خورشیدی سیلیکونی پرداخته می شود.

عنوان مقاله ی اول:

"لایه های بی شکل $\text{YbF}_3:\text{Er}$ مبدل طیف فرابنفش و نزدیک مادون قرمز با راندمان بالا" [۳۶]

در پژوهش مذکور لایه های مبدل نور $\text{YbF}_3:\text{Er}$ به روش لایه نشانی پرتو الکترونی^{۱۳} سنتز شده اند. این لایه های بی شکل در ناحیه ی ۲۰۰۰-۳۰۰۰ نانومتر بالای ۹۵ درصد طیف را عبور می دهند، همچنین سطح صاف و یکنواختی دارند.

این لایه ها تحت برانگیزش با طول موج های ۳۷۸ و ۹۸۰ نانومتر از خود نور قرمز با طول موج ۶۵۶ نانومتر گسیل می کنند. با توجه به شفافیت زیاد لایه و خاصیت مطلوب آنها که تبدیل نور فرابنفش به مادون قرمز می باشد، این لایه ها استعداد بالایی برای کاربرد در دستگاه های نوین مبدل نور مخصوصا در سلول های خورشیدی دارند. تنگناهای اساسی در مورد سلول های خورشیدی هدر رفت های گرمایی و هدر رفت های مربوط به پرتوهای فرابنفش و مادون قرمز است که انرژی آن ها در محدوده ی گاف نواری سیلیکون نیست [۳۷، ۳۸]. سلولهای خورشیدی سیلیکونی در محدوده نور مرئی جذب خوبی دارند، در حالی که گاف انرژی پهن آن که حدود ۱،۷۵ الکترون ولت است مانع جذب پرتوهای مادون قرمز می شود و برای پرتوهای در محدوده ی فرابنفش هدر رفت های گرمایی در شبکه ایجاد می - شود [۳۹]، که منجر به کاهش بازده سلول می گردند. اخیرا تبدیل طیف فرابنفش و مادون قرمز به محدوده های دیگر توسط مواد با خاصیت لومینسانس امکان بدست آوردن بازده تبدیل انرژی بالاتری را فراهم ساخته است [۴۰، ۴۱]، چون می توان نور خورشید را در محدوده ی وسیع تری جذب و بهره برداری کرد. توضیح خاصیت لومینسانس در پیوست ب آمده است.

^{۱۳} electron beam

با تبدیل به بالا^{۱۴} می توان دو یا چند پرتوی ورودی کم انرژی (با انرژی کمتر از گاف انرژی ماده) را به یک پرتوی با انرژی زیاد تبدیل کرد. در عوض با تبدیل به پایین^{۱۵} می توان یک پرتوی پر انرژی را به بیش از یک پرتوی کم انرژی (با انرژی کمتر از گاف انرژی ماده) تبدیل کرد. بنابراین تبدیل طیف نور خورشید توسط مواد با خاصیت لومینسانس کمک می کند که یک سلول خورشیدی تک پیوندگاهی گستره ی وسیع تری از نور خورشید را به الکتروسیسته تبدیل کند [۴۲, ۴۳].

تبدیل طیف موثر را می توان با ترکیب آلایش هایی از یون های کمیاب لانتانید بدست آورد، چون یون های کمیاب لانتانید به محدوده ی وسیعی از طیف نور خورشید از فرابنفش تا مادون قرمز عکس العمل نشان می دهند. در میان موادی که با لانتانیدها آلایش می یابند محیط فلورید بر محیط اکسید مرجح است و این به خاطر انرژی فونونی کمتر، حلالیت بیشتر و شفافیت زیاد آن از ناحیه ی فرابنفش تا مادون قرمز است [۴۴, ۴۵]. این موارد هم به عنوان مواد با خاصیت تبدیل به بالا [۴۶, ۴۷] و هم تبدیل به پایین [۴۸, ۴۹] برای بهبود بازده تبدیل نور در سلول خورشیدی مورد استفاده هستند.

عنوان مقاله ی دوم:

" تبدیل طیف فرابنفش به مرئی و نزدیک مادون قرمز با استفاده از شیشه ی ژرمانات آلایش یافته با Gd^{3+}/Yb^{3+} " [۵۰]

در پژوهش مذکور شیشه های ژرمانات با استفاده از روش تبرید سریع از فاز مایع ساخته شده اند. تحت تابش فرابنفش از شیشه های ژرمانات آلایش یافته با گادولینیم گسیل پهن بانندی در ناحیه ی مرئی مشاهده شده است و با تغییر میزان آلایش ایتريم نور سفید بدست آمده است. با این سیستم نور مرئی گسیل شده را نیز می توان به محدوده ی نزدیک مادون قرمز تبدیل کرد که به خوبی با گاف انرژی

^{۱۴} up-conversion

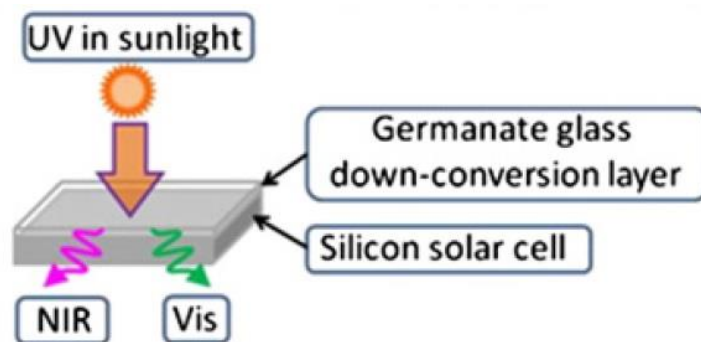
^{۱۵} down-conversion

سلول های خورشیدی سیلیکونی رایج انطباق دارد. اثر میزان آرایش Yb^{3+} با ثابت بودن میزان آرایش Gd^{3+} بر گسیل مرئی و نزدیک مادون قرمز بررسی شده است.

در نمونه ی $GZN: 0.2Gd_2O_3-0.6Yb_2O_3$ بازده تبدیل نور از مرئی به نزدیک مادون قرمز ۶۹,۳ درصد است. نتایج نشان می دهند که این ماده قابلیت کاربرد در موارد مختلفی همچون دیودهای نورگسیل^{۱۶} نور سفید و افزایش بازده سلول های خورشیدی سیلیکونی و... را دارد.

شیشه های اپتیکی در توسعه ی فناوری های نوین در زمینه ی اپتیک و فوتونیک بسیار مفیدند و این به خاطر روش های ساخت تکامل یافته و هدر رفت عبور اپتیکی کم، تهیه ی آسان در اندازه و شکل های مختلف و همچنین حلالیت بالا برای یونهای کمیاب لانتانید است [۵۱].

Gd^{3+} که با Yb^{3+} آرایش یافته می تواند فوتونهایی در ناحیه ی فرابنفش (۲۵۰ تا ۴۲۵ نانومتر) را جذب کند و در ناحیه ی مادون قرمز یعنی طول موج حدود یک میکرومتر که سلول خورشیدی سیلیکونی بیشترین عکس العمل طیفی را دارد فوتون گسیل کند [۵۲]. در شکل ۱-۳ طرح شماتیک سلول خورشیدی با لایه ی مبدل طیف شیشه ی ژرمانات آمده است [۵۰].



شکل ۱-۳ طرح شماتیک سلول خورشیدی با لایه ی مبدل طیف شیشه ی ژرمانات [۵۰]

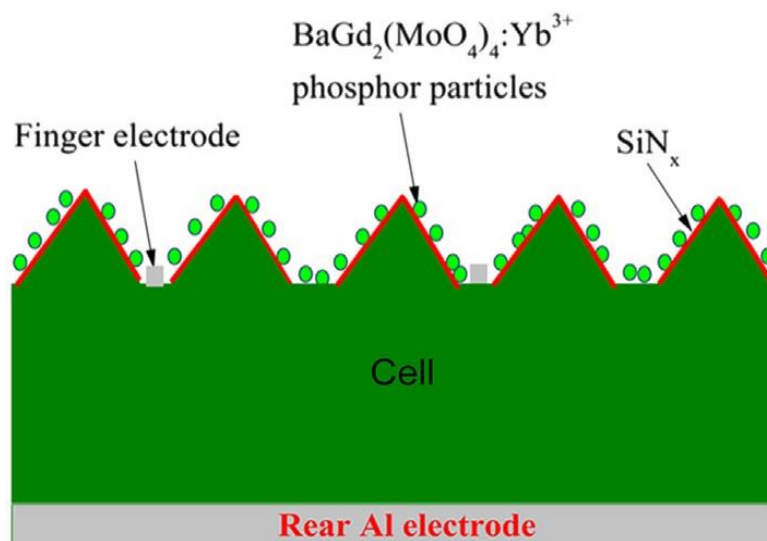
عنوان مقاله ی سوم:

"مبدل طیفی با بازده بالا برای تبدیل نور فرابنفش به نزدیک مادون قرمز برای بهبود بازده سلول های

خورشیدی سیلیکونی: $\text{BaGd}_2(\text{MoO}_4)_4$ آرایش یافته با Yb^{3+} " [۵۳]

در پژوهش فوق الذکر تبدیل با بازده بالا نور فرابنفش به مادون قرمز در ترکیب بس بلوری

$\text{BaGd}_{2-x}\text{Yb}_x(\text{MoO}_4)_4$ ($x=0.001-2.0$, i.e., Yb^{3+} concentration = $0.05-100\text{mol}\%$) نشان داده شده است. نمونه ها در طول موج های کمتر از 375 نانومتر حساسیت شان به نور بهبود یافته است. تحت تابش فرابنفش گسیل شدیدی در ناحیه ی نزدیک مادون قرمز (طول موج حدود 1000 نانومتر) مشاهده شده است. که دقیقا با ناحیه ی مطلوب عکس العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی منطبق است. مقدار بهینه ی آرایش برای افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی $20\text{ mol}\%$ پیشنهاد شده است. نمونه های مذکور توسط روش واکنش حالت جامد سنتز شده اند. جذب اپتیکی در طول موج $375-260$ نانومتر مربوط به یون های ایتیریم است. تحت تابش فرابنفش گسیل شدیدی در محدوده ی $1100-930$ نانومتر مشاهده می شود که مربوط به ایتیریم است. این نتایج می تواند برای افزایش بازده سلول های خورشیدی سیلیکونی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲-۳ طرح شماتیک سلول دارای بافت سطحی که با ذرات $\text{BaGd}_2(\text{MoO}_4)_4: \text{Yb}^{3+}$ پوشانده شده است [۵۴]

عنوان مقاله ی چهارم:

" گسیل نزدیک مادن قرمز و انتقال انرژی در $\text{Ca}_2\text{BO}_3\text{Cl}$ آرایش یافته با Eu^{2+} - Nd^{3+} " [۵۵]

در این پژوهش $\text{Ca}_2\text{BO}_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}, \text{Nd}^{3+}$ توسط روش واکنش حالت جامد سنتز شده است. این ترکیب وقتی تحت تابش با طول موج ۴۰۰ نانومتر قرار می گیرد گسیل پهن بانندی در طول موج ۵۶۰ نانومتر بدست می دهد که مربوط به Eu^{2+} است و گسیل شدیدی در ناحیه ی نزدیک به مادون قرمز، طول موج ۸۰۰-۱۴۰۰ نانومتر بدست می دهد که مربوط به یون های Nd^{3+} است.

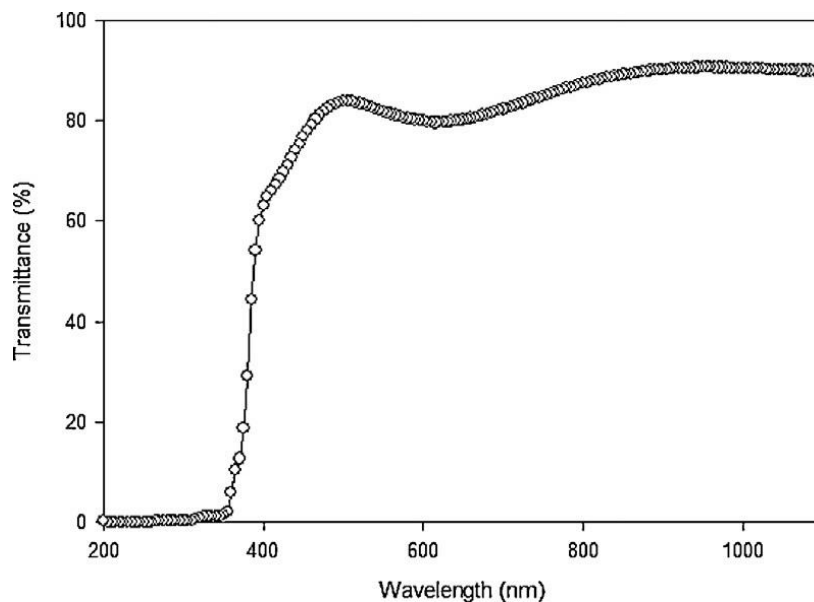
عنوان مقاله ی پنجم:

" ساخت و مشخصه یابی پوشش ضد بازتاب اکسید روی، روی سلول خورشیدی سیلیکونی میکرو بلوری لایه ی نازک انعطاف پذیر" [۵۶]

اکسید روی یک نیم رسانای با گاف انرژی پهن است، اخیرا اکسید روی پتانسیل زیادی برای کاربرد در دستگاه های اپتوالکترونیک نظیر سلول های خورشیدی و دیودهای نورگسیل و دیودهای لیزری و دستگاه های آکوستیک نوری پیدا کرده است. در سلول های خورشیدی لایه های نازک اکسید روی به عنوان پوشش کاهنده ی بازتاب و اکسید رسانای شفاف (TCO)، به خاطر عبور اپتیکی بالای آن در محدوده ی نور مرئی، گاف انرژی بالا (۳,۳ الکترون ولت)، ضریب شکست مناسب ($n \approx 2$) و رسانش طبیعی نوع n استفاده می شوند [۵۷].

این مقاله به مطالعه ی ساخت و مشخصه یابی لایه ی کاهنده ی بازتاب اکسید روی با ضخامت ۸۰ نانومتر روی سلول خورشیدی میکرو بلوری^{۱۷} لایه ی نازک انعطاف پذیر با ضخامت ۱,۳ میکرومتر می-پردازد.

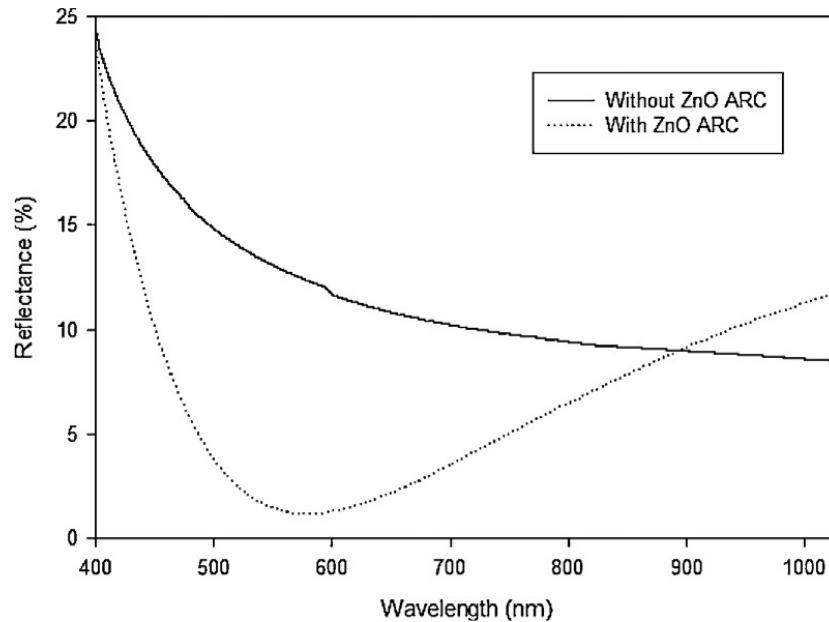
آنالیز طیف سنجی نوری از لایه ها در ناحیه ی فرابنفش تا مرئی نشان می دهد که پوشش کاهنده ی بازتاب اکسید روی میزان عبور اپتیکی بیش از ۸۰ درصد در ناحیه ی مرئی و مادون قرمز دارد. در این پژوهش لایه ی کاهنده ی بازتاب اکسید روی به ضخامت ۸۰ نانومتر توسط روش RF-اسپاترینگ روی سلول خورشیدی میکرو بلوری لایه ی نازک به ضخامت ۱,۳ میکرومتر در دمای اتاق لایه نشانی شده است. شکل ۳-۳ منحنی عبور اپتیکی لایه ی اکسید روی به ضخامت ۸۰ نانومتر ، لایه نشانی شده روی سلول خورشیدی را نشان می دهد. اندازه گیری عبور اپتیکی در محدوده ی ۱۱۰۰-۲۰۰ نانومتر توسط دستگاه طیف سنج نوری انجام شده است.



شکل ۳-۳ منحنی عبور اپتیکی لایه ی اکسید روی ، لایه نشانی شده روی سلول خورشیدی

از منحنی عبور اپتیکی می توان فهمید که اکسید روی در طول موج ۳۸۰ نانومتر میزان عبور شدیدا تغییر کرده است و در ناحیه ی مرئی به فراتر از ۸۰ درصد و در ناحیه ی مادون قرمز آن گونه که دیگر مولفان گزارش کرده اند [۵۸, ۵۹] به بیش از ۸۵ درصد می رسد و این مسئله به خاطر گاف انرژی آن است که ۳,۳ الکترون ولت می باشد. عبور اپتیکی بالا تا لبه ی طیف برای سلول خورشیدی میکرو بلوری بسیار خوب است چون لایه ی جاذب آن تا طول موج ۱۱۰۰ نانومتر جذب دارد [۶۰].

به خاطر تفاوت ضریب شکست اکسید روی و سیلیکون ، پوشش کاهنده ی بازتاب اکسید روی بازتاب سطح سلول را به ۲ درصد در طول موج ۶۰۰ نانومتر می کاهد. این مسئله در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۳-۴ منحنی بازتاب از سطح سلول خورشیدی سیلیکونی میکرو بلوری لایه ی نازک بدون پوشش کاهنده ی بازتاب اکسید روی و با ۸۰ نانومتر پوشش کاهنده ی بازتاب اکسید روی

عنوان مقاله ی ششم:

"مطالعه ی فتولومینسانس و تشدید اسپینی الکترون^{۱۸} حالت های جایگزیده در فسفر بی شکل"^[۱]

در این مقاله برانگیزش فتولومینسانس و اندازه گیری تشدید اسپینی الکترون روی فسفر قرمز بی شکل حجمی صورت گرفته است تا نقص های^{۱۹} نیکتایدها^{۲۰}(عناصر گروه ۱۵ جدول تناوبی که در این مقاله فسفر و آرسنیک هستند) شناخته شوند.

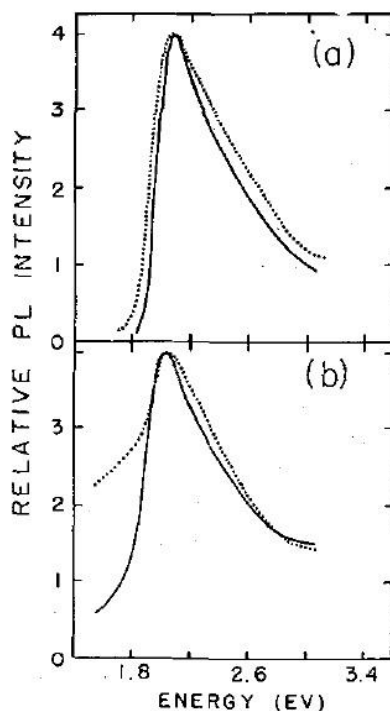
^{۱۸} electron spin resonance

^{۱۹} defects

^{۲۰} pnictide

در شکل ۴-۳۸ فصل ۴ نتایج طیف فتولومینسانس فسفر قرمز بی‌شکل حجمی با انرژی‌های برانگیزش متناظر آمده است. مکان و پهنای تراز لومینسانس در فسفر قرمز بی‌شکل حجمی هم‌گام با انرژی برانگیزش تغییر کرده است، این تغییرات در جدول ۴-۷، فصل ۴ قابل مشاهده است. قله‌ی تراز لومینسانس با تحریک توسط انرژی‌های پایین‌تر به انرژی‌های بالاتر تغییر مکان می‌دهد.

طیف برانگیزش فتولومینسانس فسفر قرمز بی‌شکل حجمی در شکل ۳-۵ آمده است. برانگیزش فتولومینسانس آن بخش از تراز لومینسانس که در ۱,۶۵ و ۱,۳۷۵ الکترون‌ولت قرار دارد در شکل ۳-۵ بخش (a) نمایش داده شده است و برانگیزش لومینسانس در انرژی‌های کمتر از ۱,۱۳ و ۰,۶۷ الکترون‌ولت در شکل ۳-۵ بخش (b) آمده است.



شکل ۳-۵ (a) طیف برانگیزش فتولومینسانس فسفر قرمز بی‌شکل حجمی، لومینسانس در انرژی ۱,۶۵ الکترون‌ولت (خط صلب) و ۱,۳۷۵ الکترون‌ولت (خط نقطه‌ای) (b) طیف برانگیزش فتولومینسانس بخشی از تراز فتولومینسانس با انرژی کمتر از ۱,۱۳ الکترون‌ولت (خط صلب) و ۰,۶۷ الکترون‌ولت (خط نقطه‌ای)

مطالعات نوری اخیر روی لایه های نازک اسپاتر^{۲۱} شده ی فسفر بی شکل نشان می دهد که ضریب جذب در این روش به سرعت افزایش می یابد و این به خاطر جذب تراز به تراز^{۲۲} ($\alpha \sim 10^3 \text{ cm}$) در ۲ الکترون ولت) است این حقیقت به وضوح نشان می دهد که تراز فتولومینسانس (قله در ۱,۴ الکترون ولت) اساساً زیر لبه ی جذب نوری واقع می شود. تراز فتولومینسانس واقع در ۱,۴ الکترون ولت در فسفر قرمز بی شکل حجمی ۰,۶۵ الکترون ولت پایین تر از قله در طیف برانگیزش واقع شده است. قرار گرفتن تراز فتولومینسانس در میان گاف و همچنین پهنای نسبتاً بزرگ تراز فتولومینسانس بیانگر آن است که برهمکنش های شدید الکترون-فونون در مکان فتولومینسانس وجود دارد.

با توجه به نتایج این تحقیق که روی آرسنیک و فسفر انجام شده است، ترازهای جذب زیر گاف نواری در تولید فتولومینسانس سهیم هستند ولی چگالی این ترازها در فسفر بی شکل حجمی نسبت به آرسنیک بی شکل حجمی کوچکتر به نظر می رسد.

عنوان اختراع:

"فسفرهای مبدل طول موج برای افزایش بازده سیستم فتولتائیک" [۶۱]

در پژوهش فوق الذکر که از نوع ثبت اختراع می باشد، به معرفی مواد فسفری پرداخته شده است که برای افزایش بازده سیستم فتولتائیک قابل استفاده هستند (به مواد غیر آلی که خاصیت لومینسانس داشته باشد اصطلاحاً فسفر گفته می شود). این مواد با تبدیل نور با طول موج کوتاه که برای سلول قابل جذب نیستند به نور با طول موج بلند که با عکس العمل طیفی سلول انطباق خوبی دارد، یعنی در ناحیه ای که عکس العمل طیفی سلول بالاست، باعث افزایش بازده سلول خورشیدی می گردد. به این پدیده یعنی تبدیل نور با طول موج کوتاه و انرژی زیاد به نور با طول موج بلند و انرژی کمتر اصطلاحاً تبدیل به پایین گفته می شود. این مواد شامل ترکیب زیر هستند.

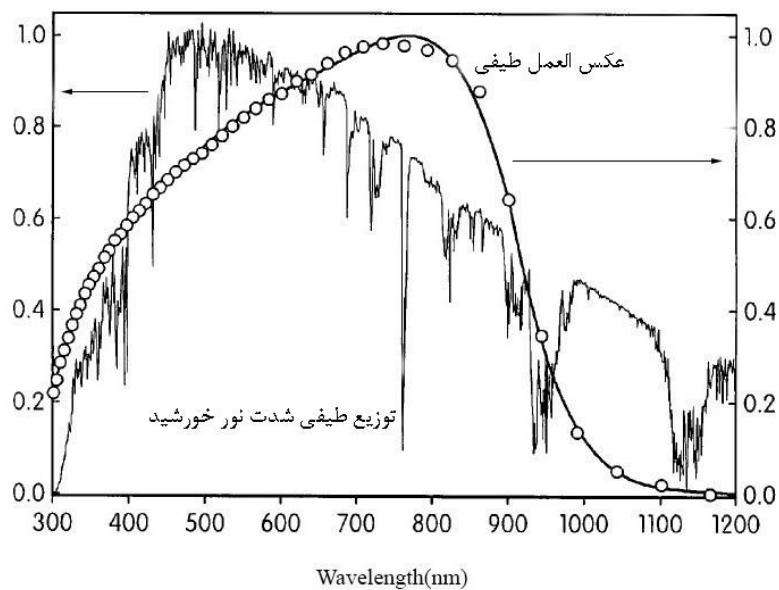
^{۲۱} sputtered

^{۲۲} band to band

$(\text{Ba}_{1-x-y}\text{Sr}_x\text{Mg}_y)_z\text{SiO}_{2+z}:\text{Eu}_x^{2+}$, $0.001 \leq x \leq 0.2$; $0.001 \leq y \leq 0.2$ و z هر مقداری بین ۱,۵ و ۲,۵ است.

جذب اپتیکی مواد معرفی شده در محدوده ی ۲۸۰ تا ۴۶۰ نانومتر قرار می گیرد. ماده ی مذکور که مبدل طیف است روی سلول قرار می گیرد و نور با طول موج های زیر ۵۰۰ نانومتر را جذب می کند و در محدوده ی طول موج ۵۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر که سلول های خورشیدی سیلیکونی بس بلوری بیشترین حساسیت به نور را دارند توسط فرایند فتولومینسانس نور گسیل می کند. توضیح فرایند فتولومینسانس در پیوست ب آمده است.

در شکل ۳-۶ منحنی توزیع شدت نور خورشید AM1.5G در طول موج های مختلف و منحنی عکس العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی آمده است که با مقایسه ی آنها می توان پی برد که در طول موج های زیر ۵۰۰ نانومتر که شدت نور خورشید بیشتر است، عکس العمل طیفی سلول کمتر است و برعکس در طول موج های بلندتر محدوده ی ۸۰۰ نانومتر که شدت نور کمتر است، عکس العمل سلول بیشتر است، که این دلیل بازده کم سلول می تواند باشد. عکس العمل طیفی در بخش ۴-۱ تعریف شده است.



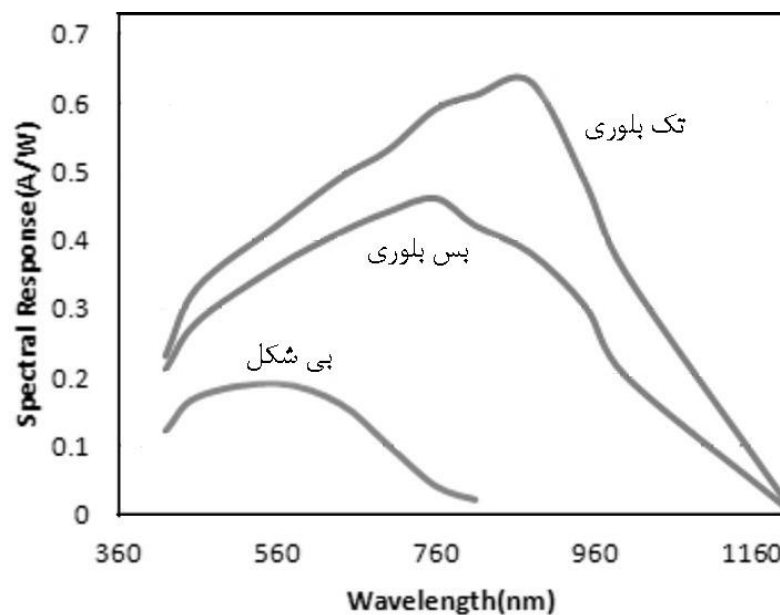
شکل ۳-۶ منحنی توزیع طیفی شدت نور خورشید و منحنی عکس العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی در طول موج های مختلف

فصل چهارم: آزمایش ها و اندازه گیری ها و نتایج

۴-۱ عوامل پایین بودن بازده سلول های خورشیدی و روش افزایش بازده

گاف انرژی سلول خورشیدی سیلیکونی بلوری 1.12 eV است [۵۴, ۵۵]. یکی از عوامل مهم پایین بودن بازده سلولهای خورشیدی سیلیکونی این است که فوتون های با انرژی پایین تر از گاف انرژی جذب نمی شوند و فوتون های با انرژی بالاتر، انرژی اضافه شان به صورت انرژی جنبشی جفت الکترون-حفره ی تولید شده در می آید و در نتیجه به صورت گرما هدر می رود [۵۴, ۵۵, ۶۲].

عکس العمل طیفی پارامتری است که نسبت حامل های جمع شده (جریان اتصال کوتاه سلول [۱۹]) به شار فوتونی فرودی در یک طول موج مشخص برای سلول خورشیدی را نشان می دهد [۶۳]. در شکل ۴-۱ نمودار میزان عکس العمل طیفی سه نوع سلول خورشیدی سیلیکونی به طیف نور تابشی آمده است، با بررسی این منحنی مشخص است که در ناحیه ی فرابنفش یعنی طول موج ۴۲۵-۲۵۰ نانومتر [۵۰] عکس العمل طیفی سلول ضعیف است.



شکل ۴-۱ نمودار عکس العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی بر حسب طول موج تابشی [۶۳]

یک راهکار برای افزایش بازده سلول خورشیدی این است که کاری کنیم انرژی در ناحیه ی فرابنفش هدر نرود و بیشتر جذب گردد. برای این منظور می توان طیف فرابنفش را به بخش قابل جذب تری از

طیف نور تبدیل کرد و برای رسیدن به این هدف می توان از مواد با خاصیت فتولومینسانس استفاده کرد به نحوی که ماده ی مذکور طیف فرابنفش نور خورشید را جذب کند و در ناحیه ای که سلول عکس العمل خوبی به نور تابشی دارد گسیل داشته باشد. برای این منظور در این تحقیق از ماده ی فسفر استفاده شد. فسفر به خوبی می تواند طول موج های نزدیک ناحیه ی فرابنفش را جذب کند و در ناحیه ی مادون قرمز گسیل داشته باشد [۱] و این چیزی است که مد نظر ماست.

۴-۱-۱ ویژگی های ساختاری فسفر

دو گونه ی رایج فسفر، فسفر سفید و فسفر قرمز هستند. فسفر سفید P_4 به شدت واکنش پذیر است و به صورت خودبخودی در مجاورت هوا، حتی در دمای اتاق آتش می گیرد، در حالت متراکم آتش گرفتن فسفر سفید در دمای کمی بالاتر از 50° درجه ی سانتی گراد انجام می شود [۶۴]. فسفر قرمز یک ساختار پلیمری دارد و می توان آن را به صورت یک ترکیب P_4 تجسم کرد که یک پیوند p-p شکسته شده است و یک پیوند اضافه با هرم همسایه تشکیل می دهد که منجر به یک ساختار زنجیروار می گردد. فسفر قرمز با حرارت دادن فسفر سفید تا 250° درجه ی سانتی گراد در غیاب هوا یا قرار دادن آن در معرض آفتاب قابل حصول است، فسفر حاصل بسیار پایدارتر خواهد بود [۶۵]. بعد این فرایند فسفر ساختار بی شکل خواهد داشت و با حرارت بیشتر این ماده ساختار بلوری می یابد. فسفر قرمز در حدود 300° درجه ی سانتی گراد آتش می گیرد [۶۴]. بر خلاف فسفر سفید، فسفر قرمز انحلال پذیری کمی دارد و سمی نیست. مانند فسفر سفید، فسفر قرمز مستقیماً با اکسیژن و سولفور و هالوژن ها و فلزات ترکیب می شود، هر چند واکنش آن ضعیف تر است [۶۶].

۴-۲ آزمایش های انجام شده

در این پژوهش سلولهای خورشیدی سیلیکونی بلوری برای افزایش بازده مورد استفاده قرار گرفتند و توسط روش لایه نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی روی این سلول ها ضخامت های متفاوتی از فسفر لایه نشانی گردید، توضیح روش تبخیر حرارتی فیزیکی در پیوست الف آمده است، در کنار سلول ها در هر

لایه نشانی یک لامل شیشه ای قرار داده شد، تا همان ضخامتی از فسفر که روی سلول ها می نشیند روی لامل شیشه ای هم بنشیند و برای اندازه گیری میزان بازتاب و عبور و جذب لایه ی فسفر از این لامل برای مشخصه یابی استفاده شد. برای لایه نشانی از فسفر قرمز با چگالی 2.2 g/cm^3 و خلوص بالای ۹۷ درصد استفاده شد.

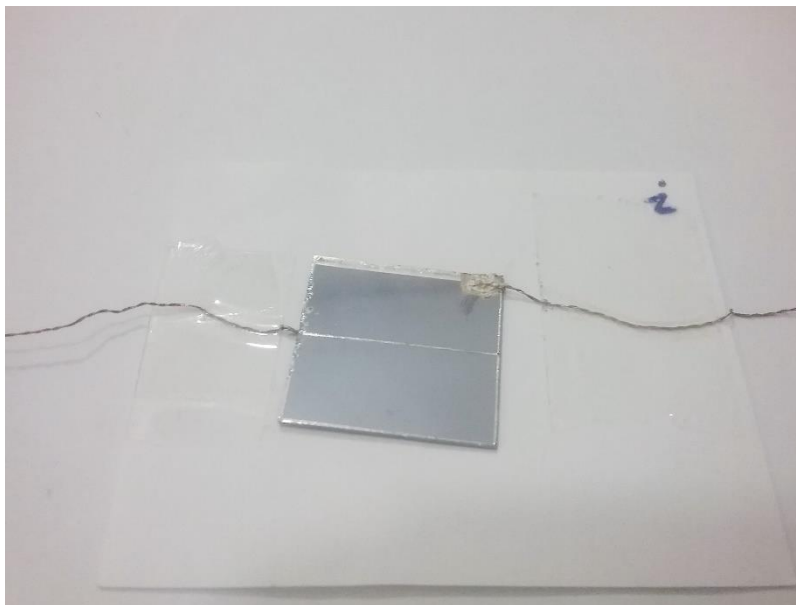
مشخصات و بازده سلولها قبل لایه نشانی فسفر توسط دستگاه شبیه ساز نور خورشید مدل NanoSAT-IIS-210+ در شرایط استاندارد AM1.5D اندازه گیری گردید. بعد از لایه نشانی فسفر مجدداً این پارامترها توسط دستگاه شبیه ساز و شرایط استاندارد اندازه گیری شد. میزان جذب و عبور و بازتاب لایه ها و همچنین بازتاب سلولها با دستگاه، SHIMADZU-UV-1800-SPECTROPHOTOMETER اندازه گیری شد.

۴-۲-۱ فرایند لایه نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی

برای لایه نشانی ابتدا زیر لایه های شیشه ای (لامل) که بعداً برای آنالیز طیف سنجی نوری مورد استفاده قرار خواهند گرفت، تمیز و شسته شدند، نحوه ی شستشو بدین صورت است که زیرلایه ها را ابتدا با استون و اتانول تمیز نموده و سپس با آب مقطر شستیم تا گرد و غبار و ناخالصی وارد محیط و زیرلایه نشود.

سلولهای خورشیدی سیلیکونی را که برای لایه نشانی تمیز و آماده کرده ایم باید اتصال سیم فلزی داشته باشند برای این منظور از چسب نقره به خاطر رسانایی بالای این نوع چسب برای اتصال سیم فلزی به سلول خورشیدی استفاده کردیم. در گام بعدی سلول های آماده شده را همراه زیرلایه های آماده شده کنار هم قرار داده و درون دستگاه لایه نشانی تبخیر حرارتی در فاصله ی ثابت و معینی از منبع تبخیر قرار دادیم، این فاصله برای این لایه نشانی ها ۸ سانتی متر در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه فسفر به صورت پودر است بسیار سریع تبخیر و قبل انجام لایه نشانی مناسب توسط پمپ خلاء از سیستم خارج می شود، بنابراین باید تمهیداتی اندیشید که قبل تبخیر و خروج تمام فسفر از محفظه ی

خلاء لایه نشانی تا مقدار مورد انتظار انجام شود، یکی از این تمهیدات همین است که فاصله ی زیر لایه ها را از منبع تبخیر در حد مناسب انتخاب کنیم.



شکل ۲-۴ سلول خورشیدی سیلیکونی دارای اتصال سیم فلزی



شکل ۳-۴ نمایی از سلول های آماده شده جهت قرارگیری در دستگاه

در گام بعدی نوبت به آماده سازی فسفر می رسد. برای این منظور پودر فسفر را کاملا نرم و یکدست کردیم تا تبخیر به صورت یکنواخت انجام شود. سپس پودر فسفر را باید روی بوته ی تنگستن قرار دهیم، به دلیل اینکه فسفر بسیار واکنش پذیر است و سرعت تبخیر بالایی هم دارد برای جلوگیری از واکنش فسفر با تنگستن و همچنین کاستن از سرعت تبخیر فسفر آن را ابتدا روی یک تکه آلومینا ریختیم و سپس آلومینا را روی تنگستن قرار دادیم.



شکل ۴-۴ نمایی از فسفر و آلومینا روی بوته ی تنگستن

بعد از انجام مراحل بالا یعنی جاگذاری سلولهای سیلیکونی و زیرلایه ها در سیستم و بستن بوته ی تنگستن بین دو اتصال دستگاه تبخیر حرارتی فیزیکی، نوبت به درزگیری و بستن محفظه ی خلاء می رسد، باید مطمئن شد محفظه ی خلاء هیچ نشتی ندارد. قبل شروع به کار کل فضای داخلی سیستم تبخیر حرارتی توسط استون و اتانول تمیز شد و همچنین توسط سمباده ی نرم تمام سطوح داخلی دستگاه که در مجاورت منبع تبخیر قرار دارد تمیز شد تا از ورود ناخالصی در حین فرایند لایه نشانی جلوگیری شود.

چون فسفر به شکل پودر است و سریع از محفظه خارج می شود لایه نشانی را در خلاء 10^{-3} torr شروع کردیم. مقدار جریان اعمال شده به بوته ی تنگستن را به آرامی زیاد کردیم به نحوی که فرایند لایه نشانی با سرعت یکنواخت انجام شود، یکنواخت و آرام بالا بردن جریان اعمالی به بوته ی تنگستن کمک می کند که فسفر به صورت مناسب و آرام تبخیر شود و تبخیر آن حالت ناگهانی و انفجاری نداشته باشد. بعد از رسیدن ضخامت لایه ی فسفر به میزان مورد نظر به آرامی و با سرعت یکنواخت

جریان اعمالی به بوته را پایین آوردیم تا مقدار آن به صفر برسد، این کار کمک می کند بوته به آرامی سرد شود. بعد از اطمینان از سرد شدن بوته ی تنگستن، می توان خلاء محفظه را شکست و بوته و زیرلایه ها را خارج نمود. ضخامت سنج دستگاه از نوع ضخامت سنج بلور کوارتز می باشد و در شکل ۴-۵ نمایی از آن آمده است. همچنین نمایی از دستگاه تبخیر حرارتی فیزیکی در شکل ۴-۶ آمده است.



شکل ۴-۵ نمایی از ضخامت سنج بلور کوارتز دستگاه



شکل ۴-۶ نمایی از دستگاه لایه نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی

در این پروژه لایه نشانی با ضخامت های مختلفی انجام شد. و بعد هر لایه نشانی مشخصات سلول از جمله بازده اندازه گیری شد و همچنین از لایه های فسفر طیف سنجی نوری به عمل آمد.

۴-۲-۲ اندازه گیری بازده و سایر پارامتر های سلول خورشیدی سیلیکونی

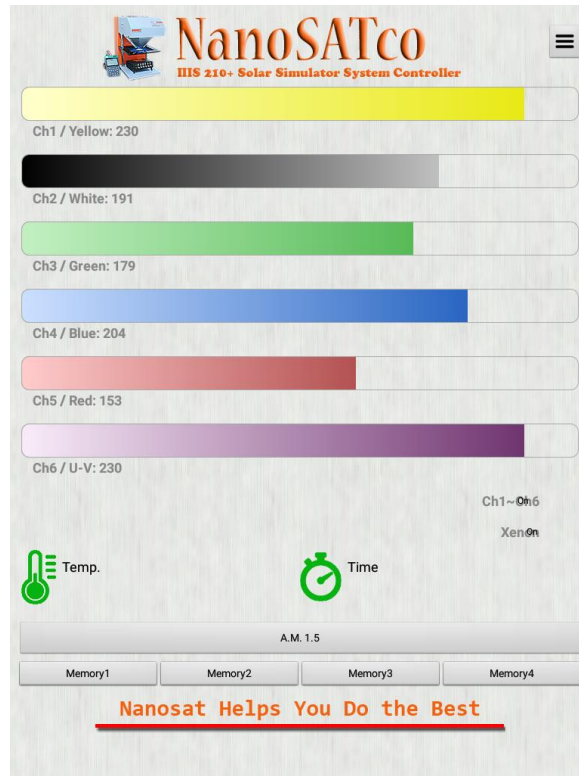
بازده و سایر پارامترهای سلولها قبل هر لایه نشانی فسفر توسط دستگاه شبیه ساز نور خورشید مدل NanoSAT-IIIS-210+ در شرایط استاندارد AM1.5D اندازه گیری گردید. بعد از لایه نشانی فسفر مجدداً بازده و سایر پارامترهای سلولها توسط دستگاه شبیه ساز و شرایط استاندارد اندازه گیری شد.

برای اندازه گیری پارامترهای سلول خورشیدی سیلیکونی اولین گام تنظیم منبع نور است به نحوی که طیف استاندارد AM1.5D را بدست دهد. برای این منظور باید از دستگاه پاورمتر که برای اندازه گیری توان نور تابشی استفاده می شود، استفاده نمود و توان تابشی چشمه ی نور دستگاه شبیه ساز خورشید را روی مقدار $1 \frac{kw}{m^2}$ تنظیم نمود. با استفاده از دستگاه پاورمتر این عملیات انجام شد و با تغییر ارتفاع سطح سلولها و همچنین تنظیم طیف تابشی در تنظیمات لامپ های دستگاه، مقدار تابش روی $1 \frac{kw}{m^2}$ تنظیم گردید.

دستگاه شبیه ساز مورد استفاده دارای دو نوع لامپ است، که یک سری از نوع دیود نورگسیل و با فرکانس های مختلف از ناحیه ی مرئی و فرابنفش هستند و نوع دوم لامپ زنون می باشد.



شکل ۴-۷ نمایی از دستگاه پاورمتر مورد استفاده



شکل ۴-۸ (الف) نمایشی از صفحه ی تنظیمات طیف تابشی دستگاه شبیه ساز خورشید



شکل ۴-۸ (ب) نمایشی از دستگاه شبیه ساز خورشید و I-V curve همراه آن

دستگاه I-V curve وسیله ای است که جریان و ولتاژ سلول را در یک بازه ی زمانی اندازه گیری می کند و بدست می دهد. از روی این داده ها می توان I_{sc} , V_{oc} , V_{mp} , I_{mp} که پارامترهای سلول می باشند را استخراج کرد.

بعد از اعمال تنظیمات لازم دستگاه را روشن کرده و پارامترهای سلول که عبارتند از I_{sc} , V_{oc} , V_{mp} , I_{mp} را توسط دستگاه I-V curve اندازه گیری کردیم. سپس مقدار ضریب انباشت و بازده با توجه به فرمولهای ۳-۲ و ۴-۲ محاسبه شدند، چگالی جریان از روی جریان بدست آمده از دستگاه I-V curve با تقسیم جریان بر مساحت سطح سلول که ۴ سانتی متر مربع است، محاسبه شد و همچنین نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول بر اساس داده های بدست آمده از دستگاه I-V curve رسم شده است.

۳-۴ نتایج آزمایش ها و آنالیز طیف سنجی نوری UV-VISIBLE و اندازه گیری

بازده و پارامترهای سلول خورشیدی

در جدول ۴-۱ مشخصات اندازه گیری شده ی سلول آورده شده است، این مشخصات عبارتند از:

چگالی جریان سلول در توان بیشینه ی آن است و با رابطه ی زیر با جریان سلول در توان بیشینه ی آن مرتبط است:

$$J_{mp} \left(\frac{mA}{cm^2} \right) = \frac{I_{mp}}{A} \quad (1-4)$$

$I_{mp}(mA)$: جریان سلول در توان بیشینه بر حسب میلی آمپر، دقت اندازه گیری (۰,۰۱)

در رابطه ی (۱-۴)، A مساحت سطح سلول می باشد و برابر مقدار زیر است. دقت اندازه گیری مساحت ۰,۰۱ سانتی متر مربع می باشد.

$$A = 2cm \times 2cm = 4cm^2 \quad (2-4)$$

$V_{mp}(v)$: ولتاژ سلول در توان بیشینه بر حسب ولت، دقت اندازه گیری (۰,۰۰۱)

Efficiency (%): بازده سلول برحسب درصد، برای محاسبه ی بازده سلولها از فرمول ۲-۴ استفاده شده است.

$J_{sc} \left(\frac{mA}{cm^2} \right)$: چگالی جریان اتصال کوتاه سلول است و با رابطه ی زیر با جریان اتصال کوتاه سلول مرتبط است:

$$J_{sc} \left(\frac{mA}{cm^2} \right) = \frac{I_{sc}}{A} \quad (3-4)$$

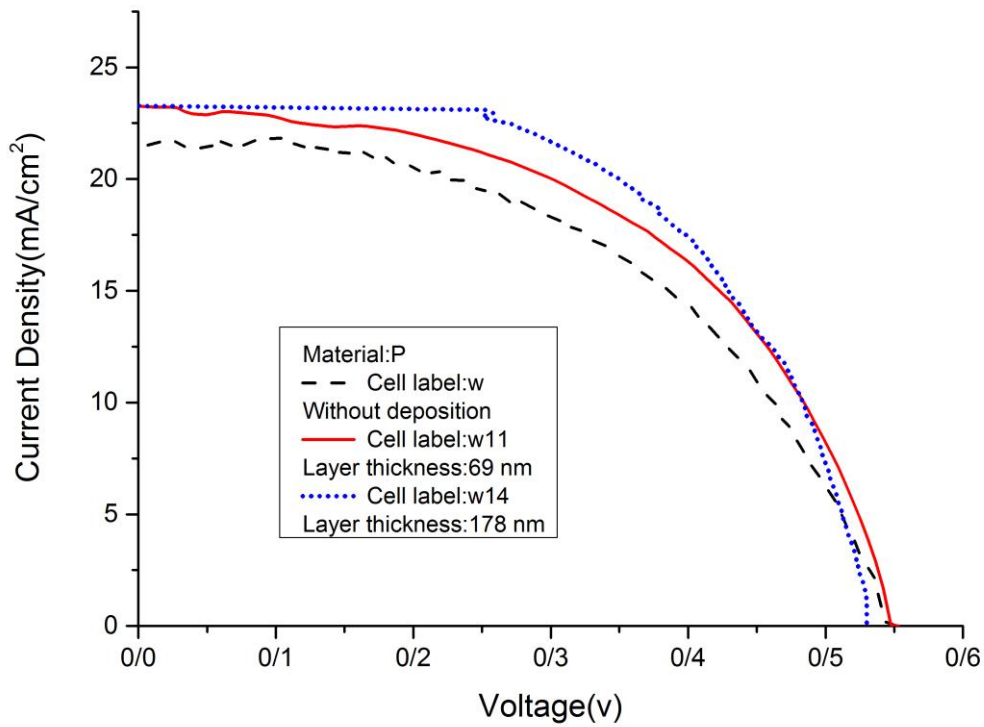
$I_{sc} (mA)$: جریان اتصال کوتاه سلول برحسب میلی آمپر، دقت اندازه گیری (۰,۰۱)

$V_{oc} (V)$: ولتاژ مدار باز سلول برحسب ولت، دقت اندازه گیری (۰,۰۰۱)

ضریب انباشت (Fill Factor): از فرمول ۲-۳ محاسبه شده است.

بعد از لایه نشانی فسفر با ضخامت های مختلف ۲۸ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۱ و ۴۱ و ۴۸ نانومتر به ترتیب سلول با برچسب های w9, w10, w11, w12, w13, w14 نام گذاری گردید (اعداد کنار w شماره ی آزمایش مربوطه هستند) و بازده سلول بعد هر مرحله لایه نشانی اندازه گیری شده است و همراه ضخامت مربوطه در جدول ۴-۱ آورده شده است، با مقایسه بازده سلولها قبل و بعد لایه نشانی آشکار است که بازده سلولها افزایش یافته است. چند نمونه از منحنی های چگالی جریان-ولتاژ سلول در شکل ۴-۹ آمده است.

در شکل ۴-۹ منحنی w11 مربوط به سلول در شرایطی است که ۶۹ نانومتر لایه ی فسفر روی آن نشسته است، منحنی w14 مربوط به سلول در شرایطی است که ۱۷۸ نانومتر فسفر روی آن نشسته است، و منحنی w مربوط به سلول در شرایطی است که هیچ لایه ی فسفری روی آن نشسته است.

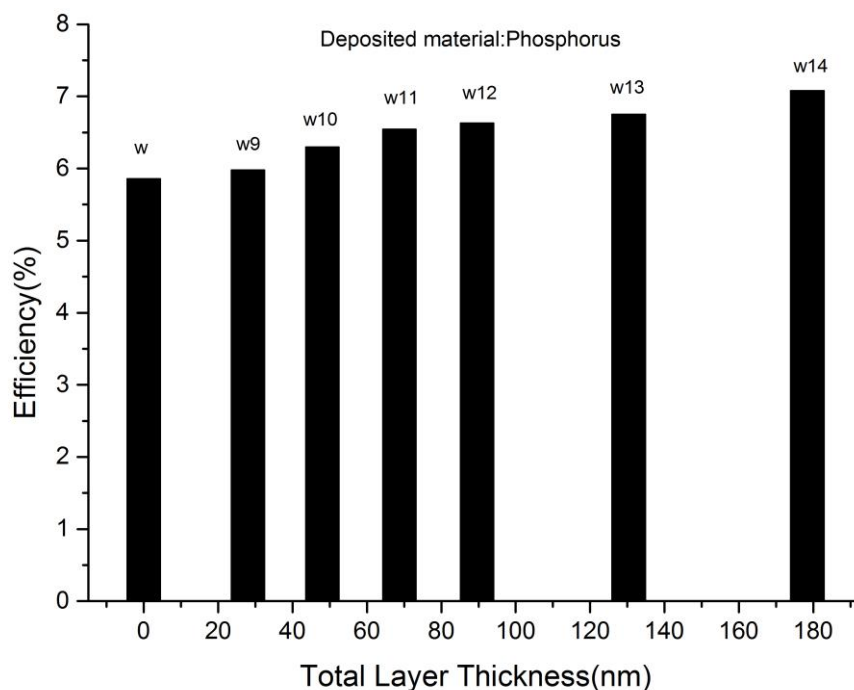


شکل ۴-۹ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول اولیه (w) و سلول (w11) و سلول نهایی (w14)

جدول ۴-۱ مشخصات و بازده سلول W قبل و بعد از هر لایه نشانی

جنس لایه	ضریب انباشت	$J_{sc} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc} (V)$	ضخامت مجموع لایه های فسفر (nm)	ضخامت لایه (nm)	میزان تغییر بازده (%)	بازده (%)	$J_{mp} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{mp} (V)$	نام سلول
	0/49	21/83	0/55	0	0		5/86	16/47	0/36	w
P	0/51	22/96	0/51	28	28	0/12	5/98	15/53	0/39	w9
P	0/46	25/17	0/55	48	20	0/32	6/29	17/43	0/36	w10
P	0/51	23/27	0/55	69	21	0/25	6/54	17/40	0/38	w11
P	0/48	24/97	0/55	90	21	0/09	6/63	17/73	0/37	w12
P				130	41	0/12	6/75	18/75	0/36	w13
P	0/57	23/28	0/53	178	48	0/33	7/08	18/78	0/38	w14

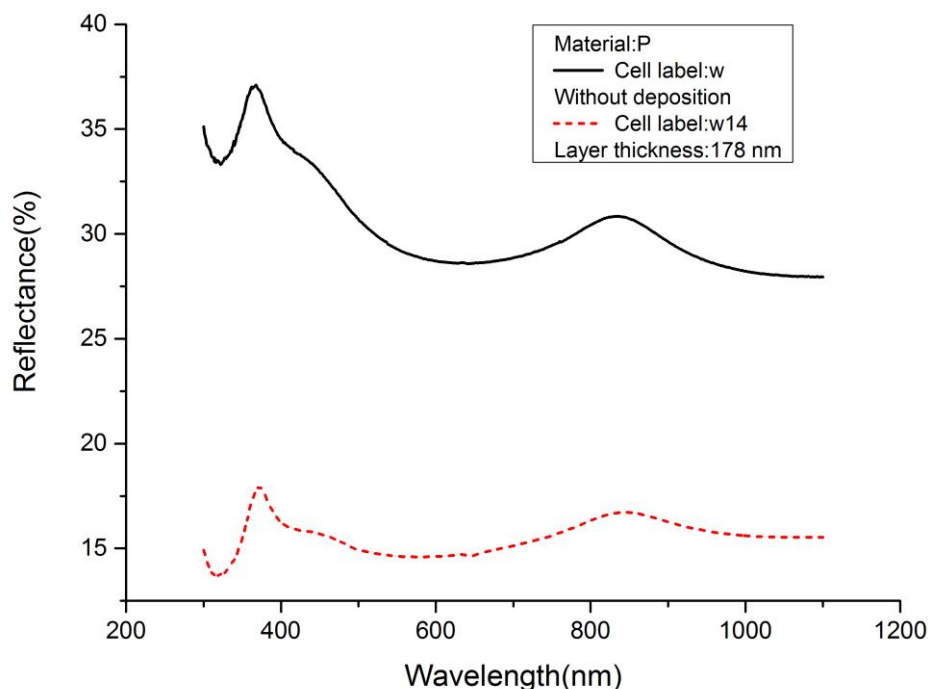
با توجه به جدول ۴-۱ ملاحظه می‌شود میزان ضریب انباشت (ff) از مقدار ۰,۴۹ به مقدار ۰,۵۷ افزایش یافته است، مقدار ایده آل این پارامتر ۱ می‌باشد. برای یافتن رابطه‌ی ضخامت لایه‌ی فسفر با میزان بازده سلول نموداری از ضخامت‌های مختلف فسفر و بازده‌های متناظر این ضخامت‌ها رسم شده است، که نشان می‌دهد میزان بازده با افزایش ضخامت لایه‌ی فسفر افزایش می‌یابد. این نمودار در شکل ۴-۱۰ آمده است.



شکل ۴-۱۰ نمودار بازده سلول W برحسب ضخامت مجموع لایه‌های فسفر روی آن

میزان بازتاب سطح سلولهای خورشیدی قبل لایه نشانی توسط دستگاه طیف سنج نوری در محدوده‌ی UV-VISIBLE اندازه‌گیری شد و بعد لایه نشانی نیز این اندازه‌گیری مجدداً انجام شد و با مقایسه‌ی این دو مشخص گردید میزان بازتاب سطح سلولها بعد لایه نشانی فسفر کاهش یافته است. کاهش بازتاب سطح سلول در ناحیه‌ی ای که عکس العمل طیفی سلول مناسب است رخ داده است و این مسئله می‌تواند از دلایل افزایش بازده سلول باشد. در شکل ۴-۱۱ منحنی بازتاب سلول قبل لایه نشانی با برچسب

w نشان داده شده است و بعد از لایه نشانی ها که مجموعاً ۱۷۸ nm فسفر لایه نشانی شده است سلول با برچسب w14 نشان داده شده است.



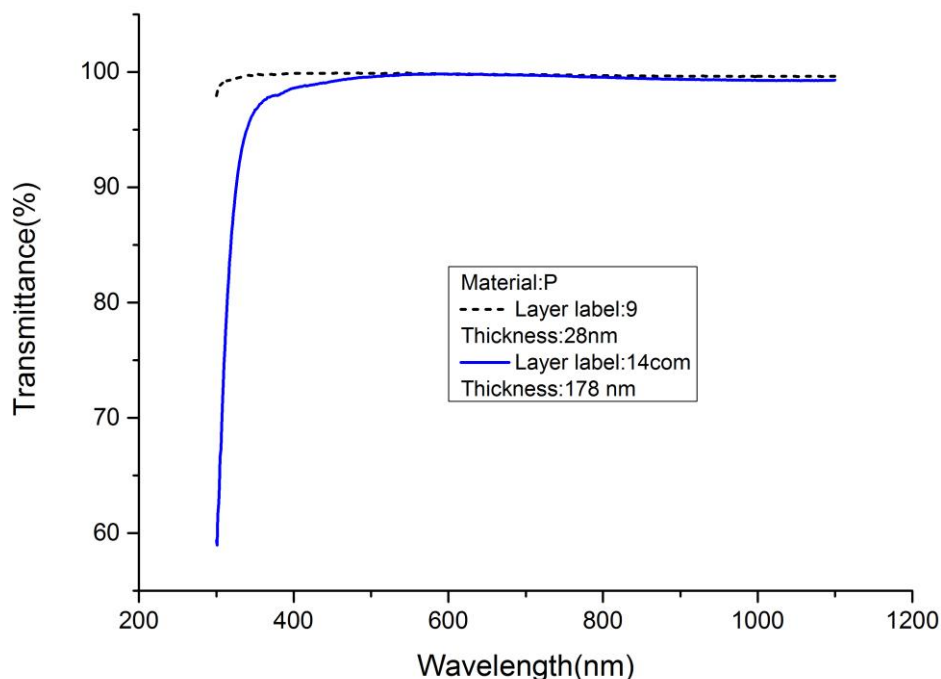
شکل ۴-۱۱ نمودار بازتاب سطح سلول W قبل و بعد از لایه نشانی

برای بررسی این که شرایط نوری برای اندازه گیری مشخصات تمام سلولها یکسان است، از ۳ عدد سلول به عنوان سلول مرجع استفاده گردید، روی این سلولها هیچ لایه ای اعمال نگردید و بازده این سلولها در هر آزمایش اندازه گیری شد تا با اطمینان از ثابت ماندن بازده این سلولها در تمام آزمایشها از یکسان بودن شرایط نوری استاندارد برای هر آزمایش اطمینان حاصل شود.

برای بررسی اثر شرایط محیطی از جمله دما بر بازده سلولها هنگام لایه نشانی از یک سلول برای کنترل شرایط استفاده شد. به نحوی که روی سلول با یک لامل شیشه ای شفاف پوشانده شد تا از رسیدن فسفر به آن جلوگیری شود با این روش و اندازه گیری بازده این سلولهای کنترل در هر آزمایش مشخص گردید میزان بازده آنها در اثر دمای محیط تغییر نکرده است، همچنین طیف بازتاب سطح این سلولها

قبل و بعد آزمایش بررسی گردید و تغییری در این طیف نیز مشاهده نگردید. این موید آن است که دما بر بازده سلولها تاثیری نداشته و افزایش بازده ایجاد شده در سلولها حاصل لایه‌ی فسفر می باشد.

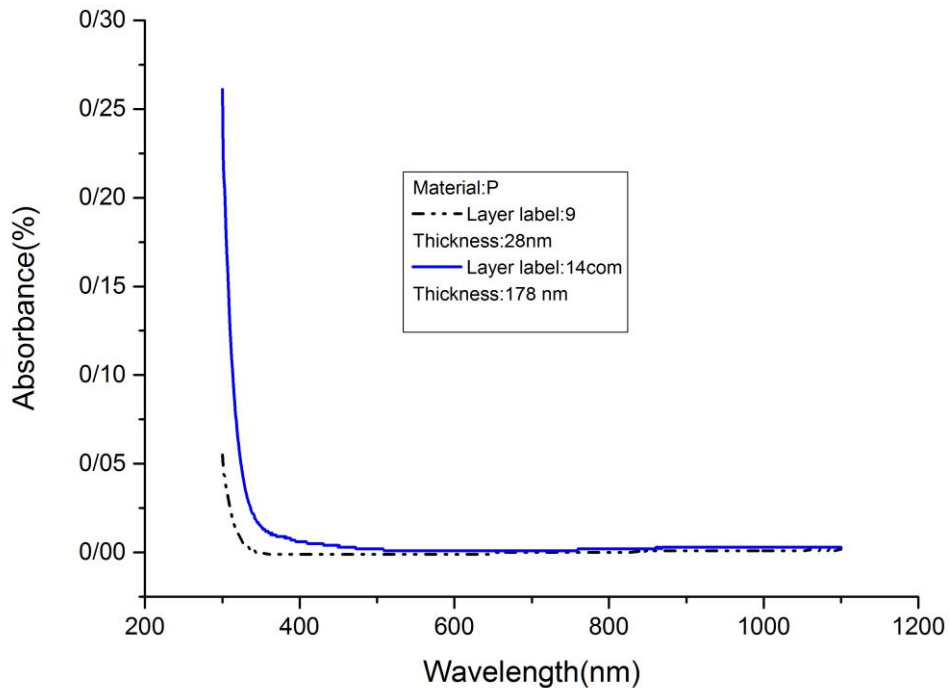
طیف عبوری لایه های فسفر توسط دستگاه طیف سنج نوری در محدوده‌ی UV-VISIBLE مشخصه یابی گردید و در شکل ۴-۱۲ آمده است. منحنی ۹ مربوط به لایه ی فسفر شماره ۹ است و منحنی 14com مربوط به لایه ای است که مجموع فسفرلایه های ۹ تا ۱۴ را در بر دارد. مشاهده می‌شود که در طول موجهای محدوده‌ی فرابنفش مقدار عبور لایه کاهش یافته است و این کاهش در لایه های ضخیم تر بیشتر است.



شکل ۴-۱۲ نمودار طیف عبوری لایه های فسفر 9-14com

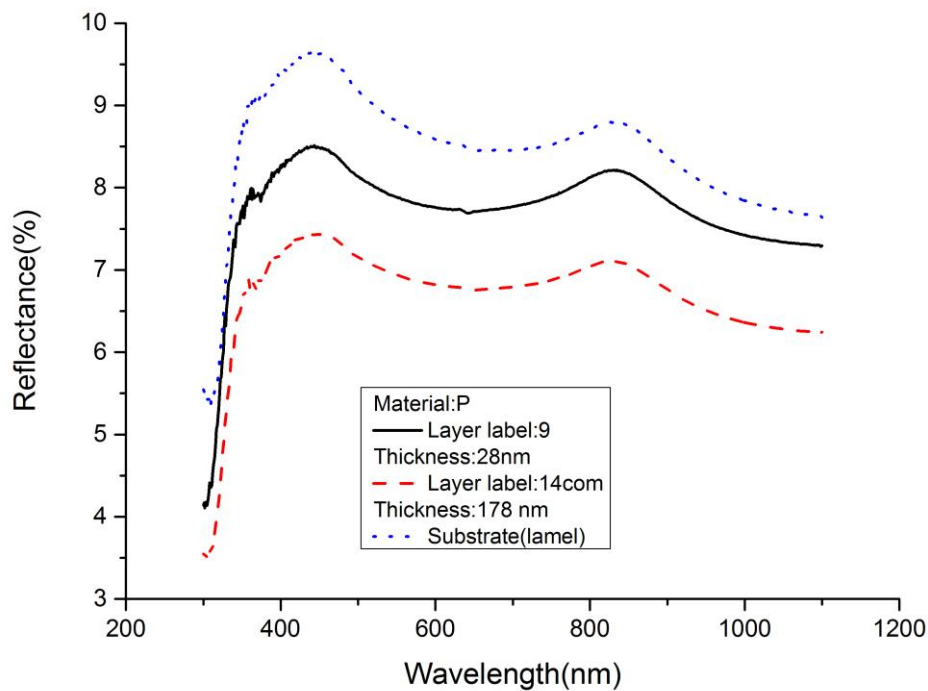
طیف جذبی لایه های فسفر در شکل ۴-۱۳ آمده است. منحنی ۹ مربوط به لایه ی فسفر شماره ۹ است و منحنی 14com مربوط به لایه ای است که مجموع فسفرلایه های ۹ تا ۱۴ را در بر دارد. مشاهده

می‌شود که با افزایش ضخامت لایه میزان جذب لایه‌ی فسفر در طول موجهای محدوده‌ی فرابنفش افزایش یافته است. باید بررسی کنیم برای این مقدار نور جذب شده چه اتفاقی افتاده است.



شکل ۴-۱۳ طیف جذبی لایه های فسفر 9-14com

طیف بازتاب لایه های فسفر در شکل ۴-۱۴ آمده است. منحنی ۹ مربوط به لایه ی فسفر شماره ۹ است و منحنی 14com مربوط به لایه ای است که مجموع فسفر لایه های ۹ تا ۱۴ را در بر دارد. همچنین منحنی بازتاب زیر لایه ی بدون لایه نشانی هم آورده شده است. مشاهده می شود ضخامت های بیشتر فسفر میزان بازتاب را کمتر می کند.



شکل ۴-۱۴ طیف بازتابی لایه های فسفر 9-14com

برای بررسی اینکه افزایش بازده سلول تا چه ضخامتی از فسفر ادامه دارد آزمایش با ضخامت‌های بالاتری از فسفر و با چهار سلول دیگر تکرار گردید و نتایج در جداول ۴-۲ و ۴-۳ و ۴-۴ و ۴-۵ آمده است.

جدول ۴-۲ مشخصات و بازده سلول e قبل و بعد از هر لایه نشانی

نام سلول	$V_{mp} (v)$	$J_{mp} (\frac{mA}{cm^2})$	بازده (%)	میزان تغییر بازده (%)	ضخامت لایه (nm)	فسفر (nm)	ضخامت مجموع لایه های	$V_{oc} (v)$	$J_{sc} (\frac{mA}{cm^2})$	ضریب انباشت	جنس لایه
e	0/33	17/30	5/62		0	0	0	0/52	18/15	0/59	
e18	0/33	17/80	5/79	0/16	37	37	37	0/52	20/73	0/53	P
e19	0/32	16/03	5/13	-0/66	215	252	252	0/52	18/65	0/53	P
e23	0/33	15/40	5/07	-0/06	84	336	336	0/53	17/38	0/55	P

جدول ۳-۴ مشخصات و بازده سلول C قبل و بعد از هر لایه نشانی

جنس لایه	ضریب انباشت	$J_{sc} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc} (v)$	ضخامت مجموع لایه های فسفر (nm)	ضخامت لایه (nm)	میزان تغییر بازده (%)	بازده (%)	$J_{mp} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{mp} (v)$	نام سلول
P	0/72	20/63	0/53	116	116		7/90	19/90	0/40	c20
P	0/71	22/50	0/54	200	84	0/70	8/61	21/30	0/40	c23
P	0/72	21/45	0/53	305	105	-0/36	8/24	20/55	0/40	c24

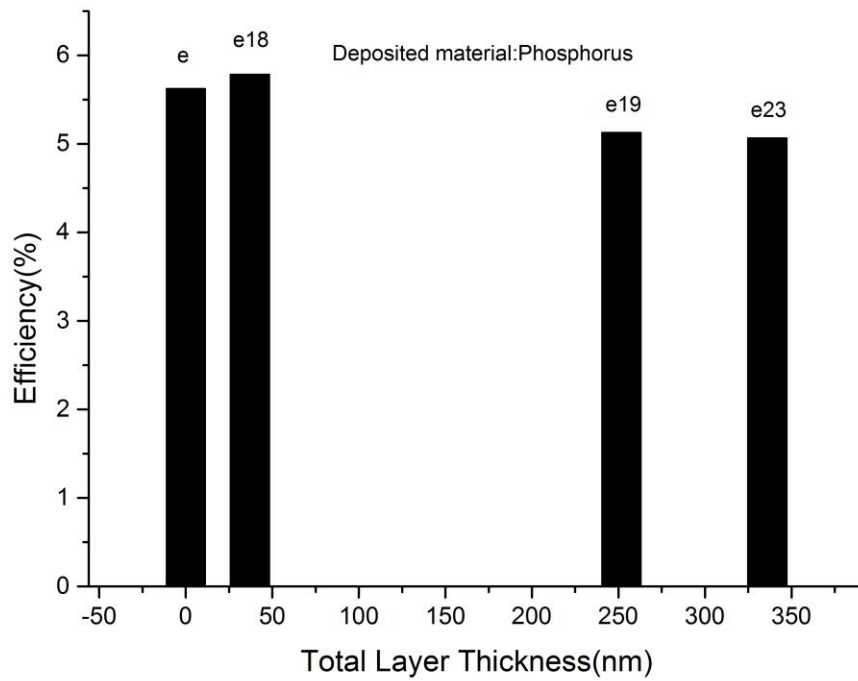
جدول ۴-۴ مشخصات و بازده سلول S قبل و بعد از هر لایه نشانی

جنس لایه	ضریب انباشت	$J_{sc} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc} (v)$	ضخامت مجموع لایه های فسفر (nm)	ضخامت لایه (nm)	میزان تغییر بازده (%)	بازده (%)	$J_{mp} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{mp} (v)$	نام سلول
	0/65	15/73	0/53	0	0		5/35	14/15	0/38	s
P	0/64	18/30	0/54	37	37	1/03	6/38	16/23	0/39	s18
P	0/67	14/63	0/53	252	215	-1/25	5/13	12/85	0/40	s19

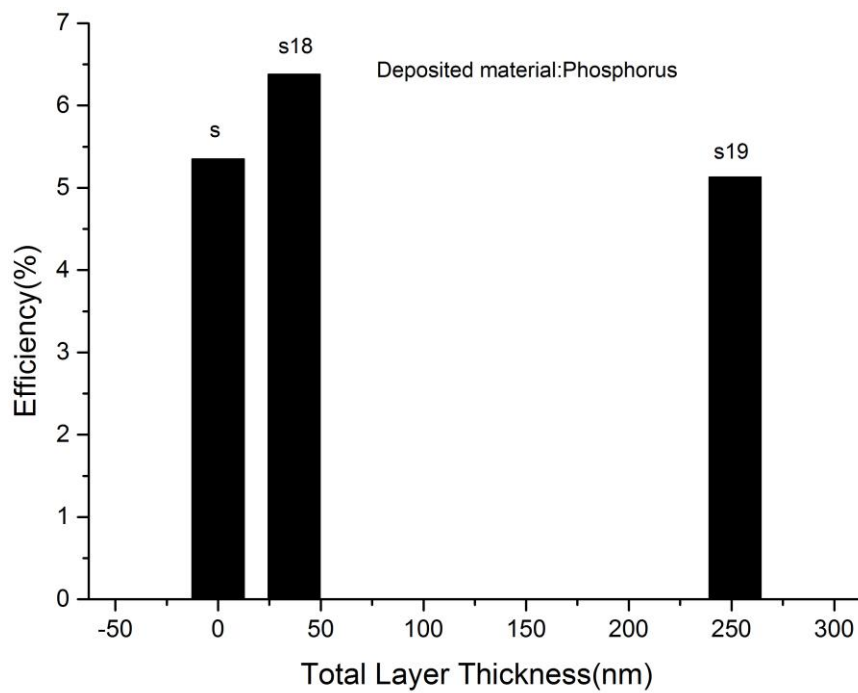
جدول ۵-۴ مشخصات و بازده سلول g قبل و بعد از هر لایه نشانی

جنس لایه	ضریب انباشت	$J_{sc} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc} (v)$	ضخامت مجموع لایه های فسفر (nm)	ضخامت لایه (nm)	میزان تغییر بازده (%)	بازده (%)	$J_{mp} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{mp} (v)$	نام سلول
	0/63	18/55	0/53	0	0		6/12	15/08	0/41	g
P	0/61	24/70	0/55	140	140	2/12	8/24	20/40	0/40	g17

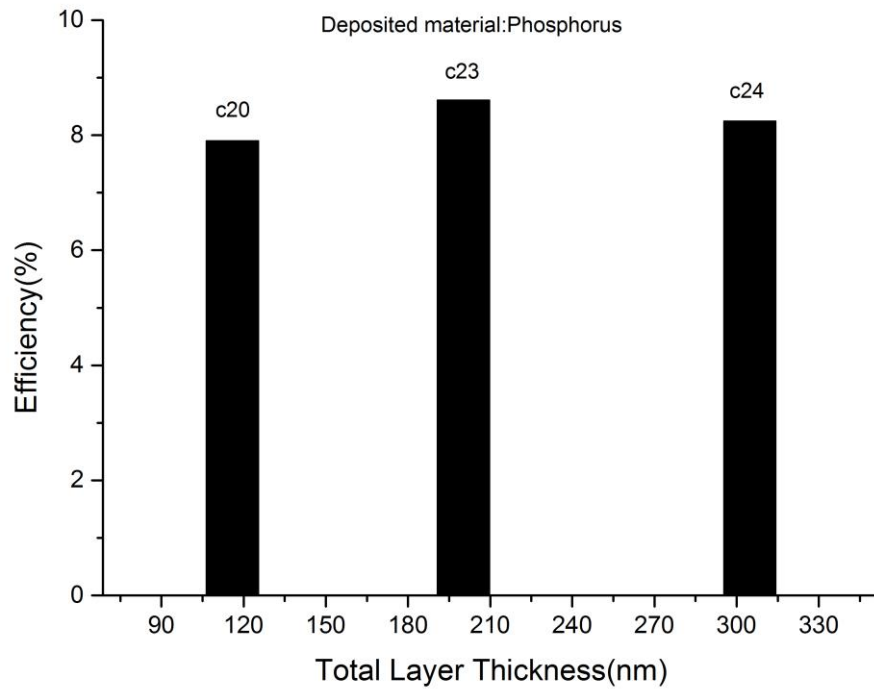
نمودار بازده بر حسب ضخامت کل لایه ها برای این سلول ها در ادامه آمده است.



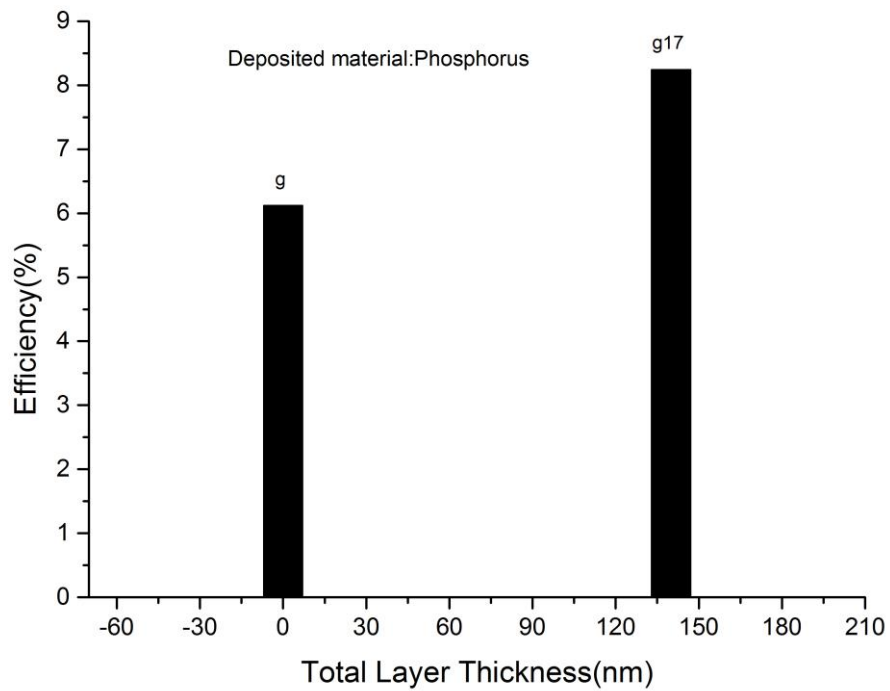
شکل ۴-۱۵ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول e



شکل ۴-۱۶ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول s

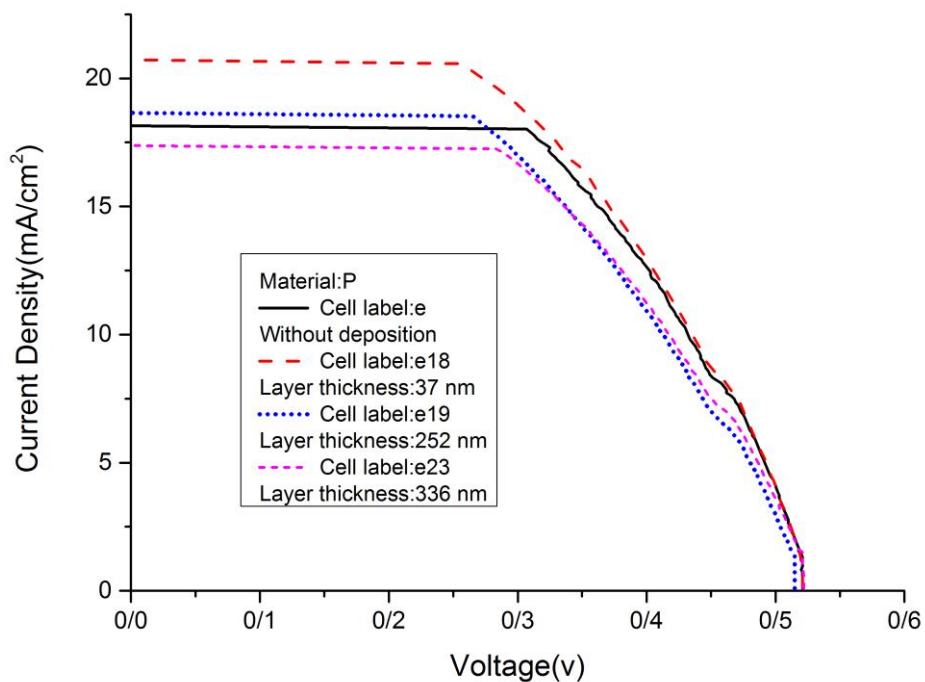


شکل ۴-۱۷ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول C

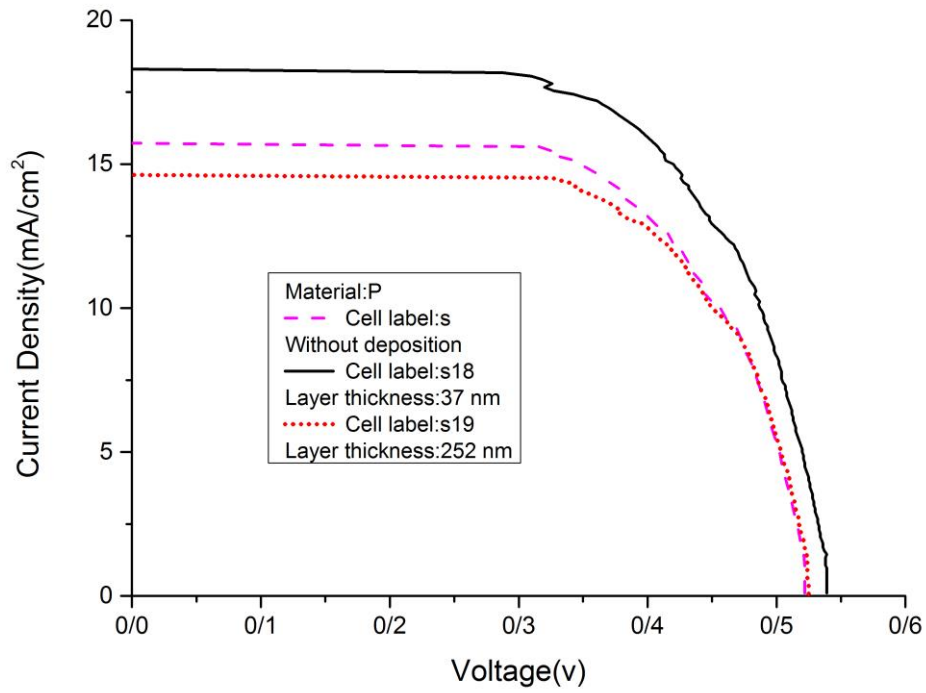


شکل ۴-۱۸ نمودار بازده برحسب ضخامت مجموع لایه های فسفر برای سلول g

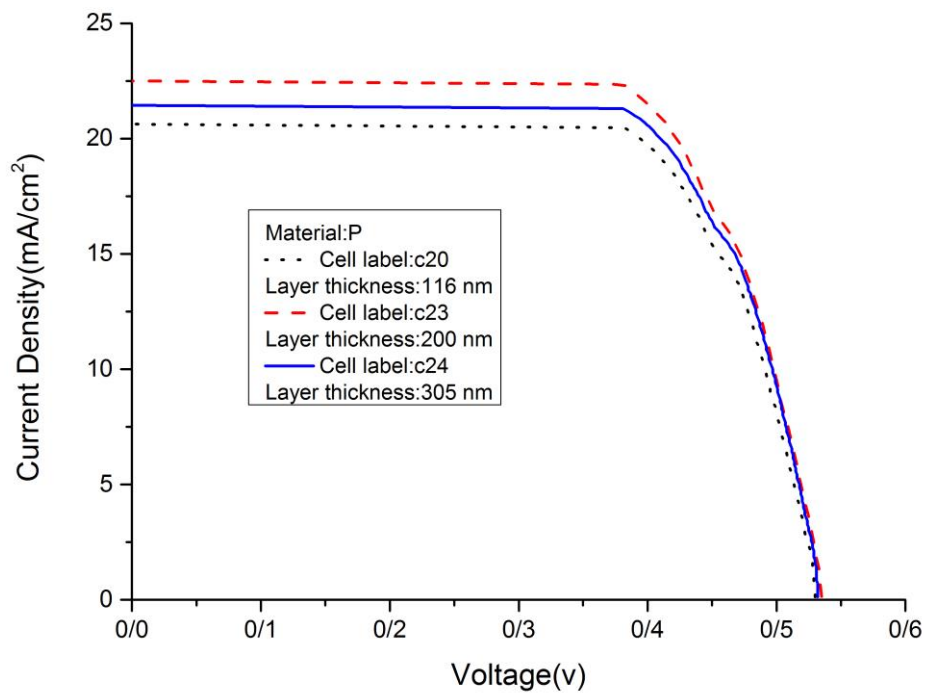
روی هر ستون برچسب هر سلول نوشته شده است. مشاهده می شود که بازده سلولها به طور تقریبی در ضخامت های بالای ۲۰۰ نانومتر کاهش پیدا کرده است. این مسئله را می توان به افزایش جذب در ناحیه ی مرئی طیف خورشید در لایه های ضخیم تر فسفر مرتبط دانست. در شکل های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ و ۴-۲۱ و ۴-۲۲ نمودار چگالی جریان ولتاژ سه سلول فوق در مراحل مختلف لایه نشانی آمده است. در شکل های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ و ۴-۲۵ و ۴-۲۶ نمودارهای بازتاب سطح سلولهای e,s,c,g آمده است.



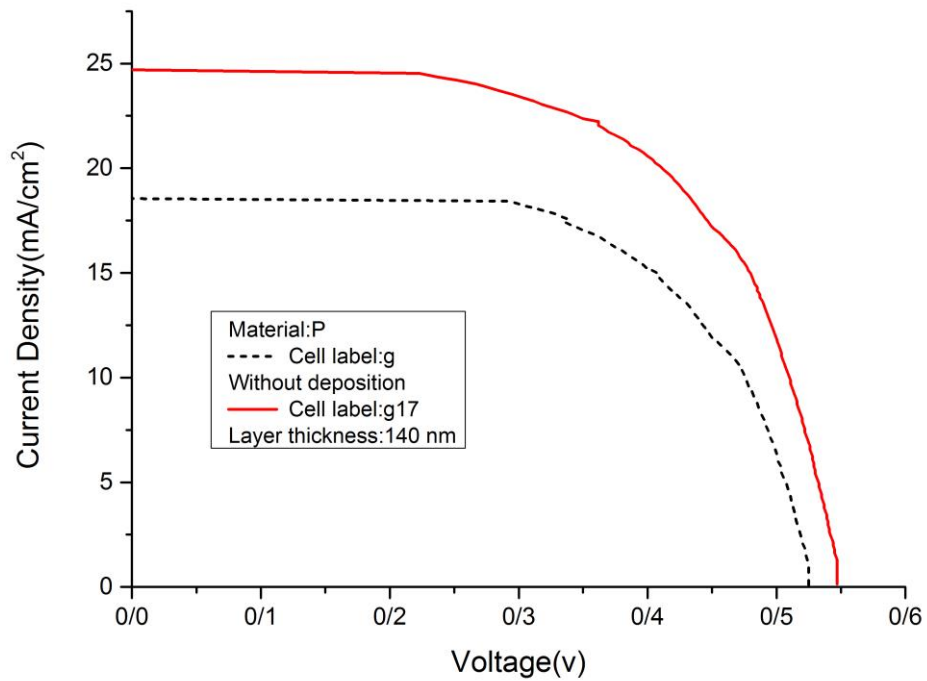
شکل ۴-۱۹ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول e



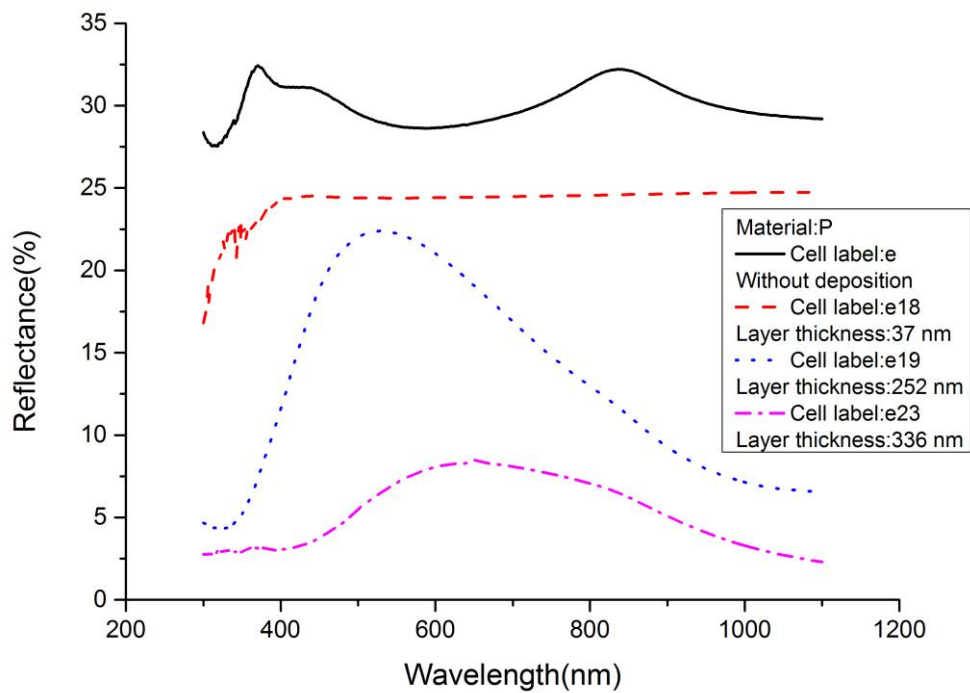
شکل ۴-۲۰ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول s



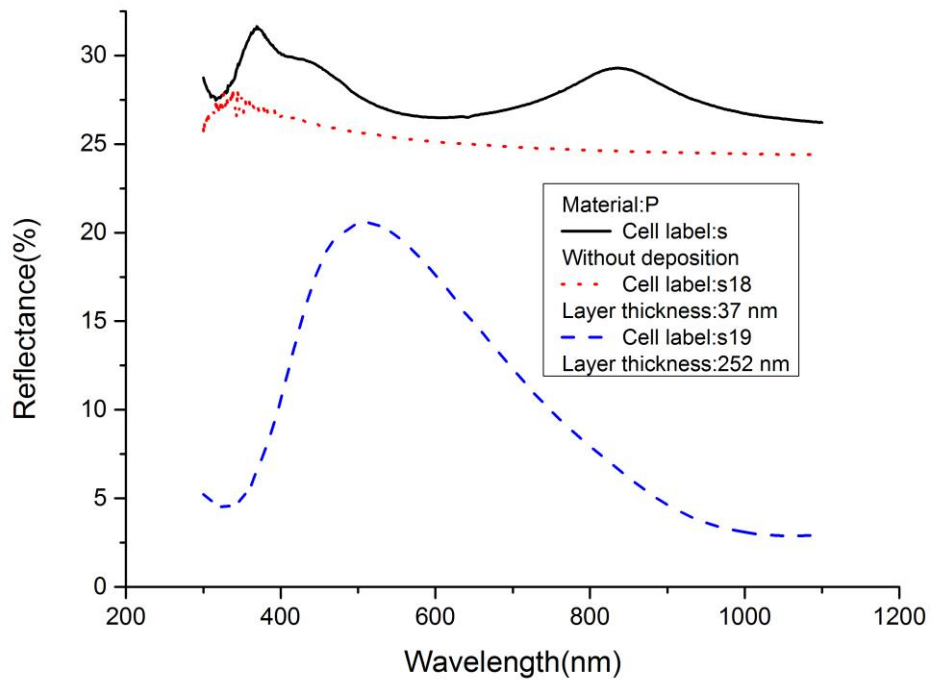
شکل ۴-۲۱ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول c



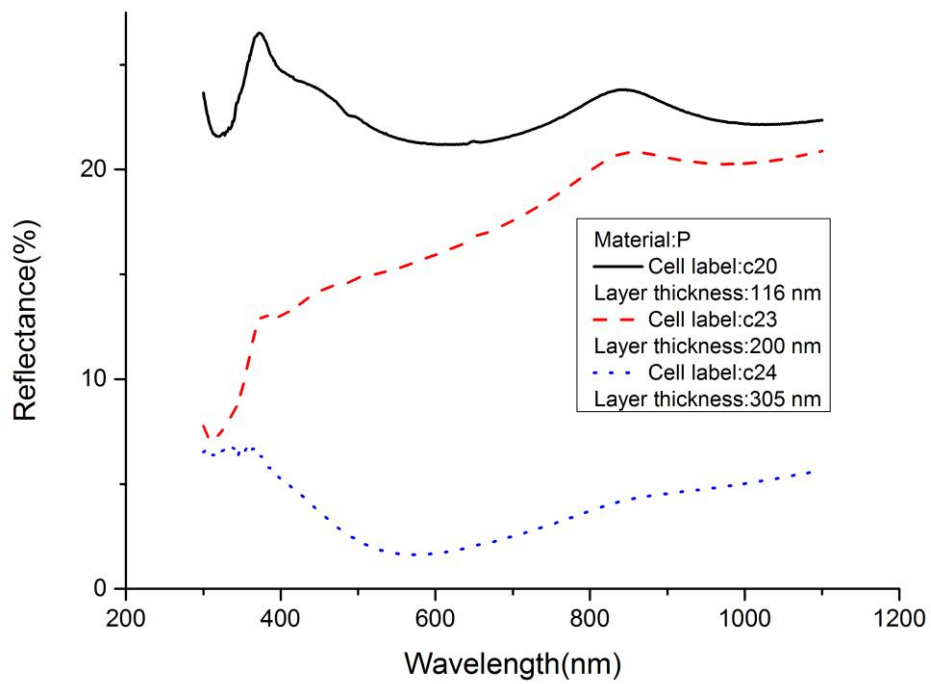
شکل ۴-۲۲ نمودار چگالی جریان -ولتاژ سلول g



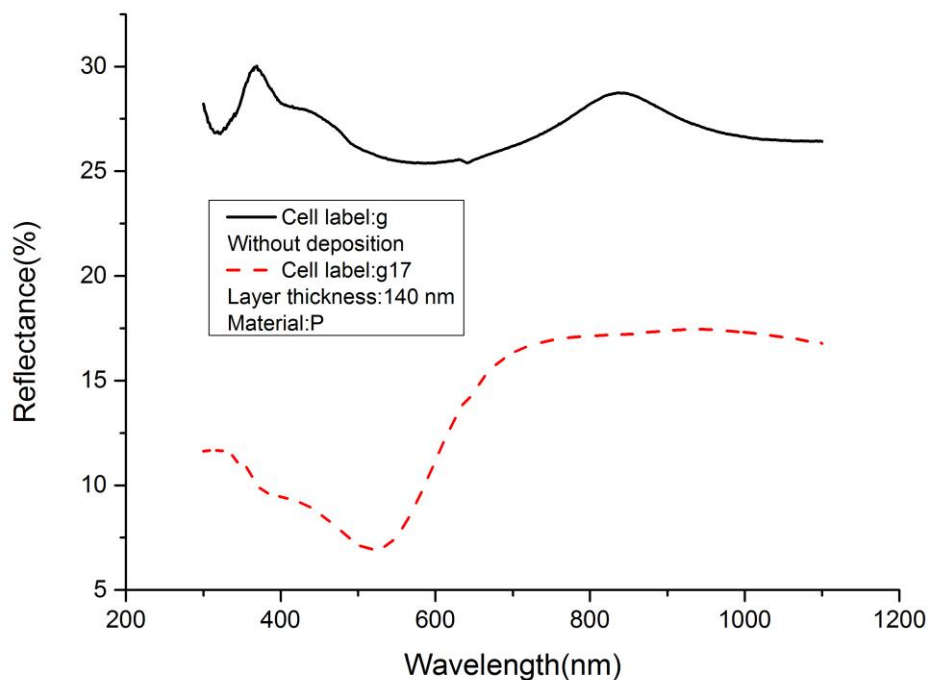
شکل ۴-۲۳ نمودار بازتاب سطح سلول e



شکل ۴-۲۴ نمودار بازتاب سطح سلول S

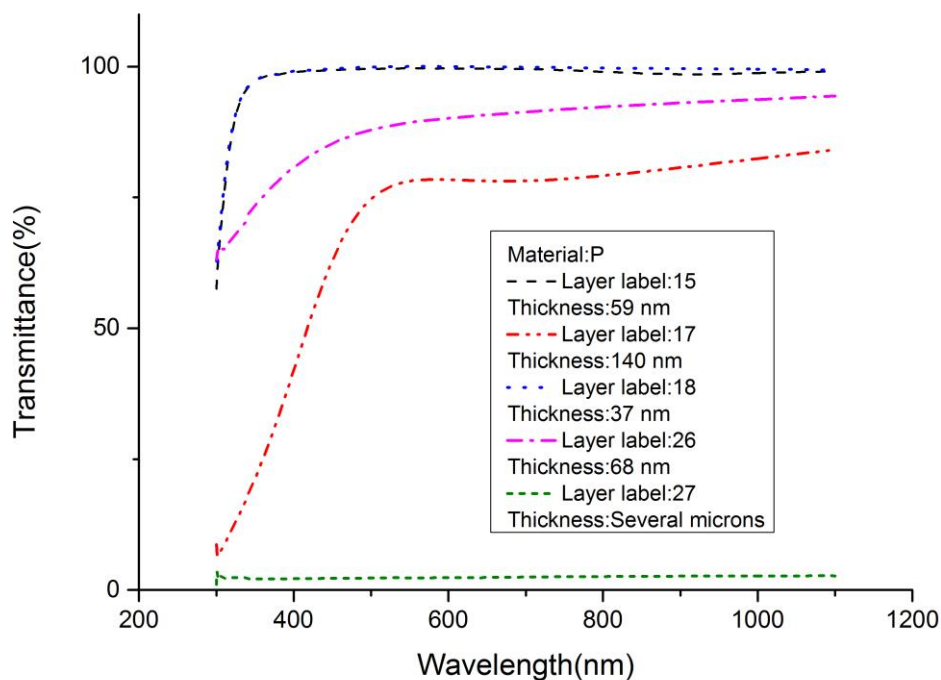


شکل ۴-۲۵ نمودار بازتاب سطح سلول C



شکل ۴-۲۶ نمودار بازتاب سلول سطح g

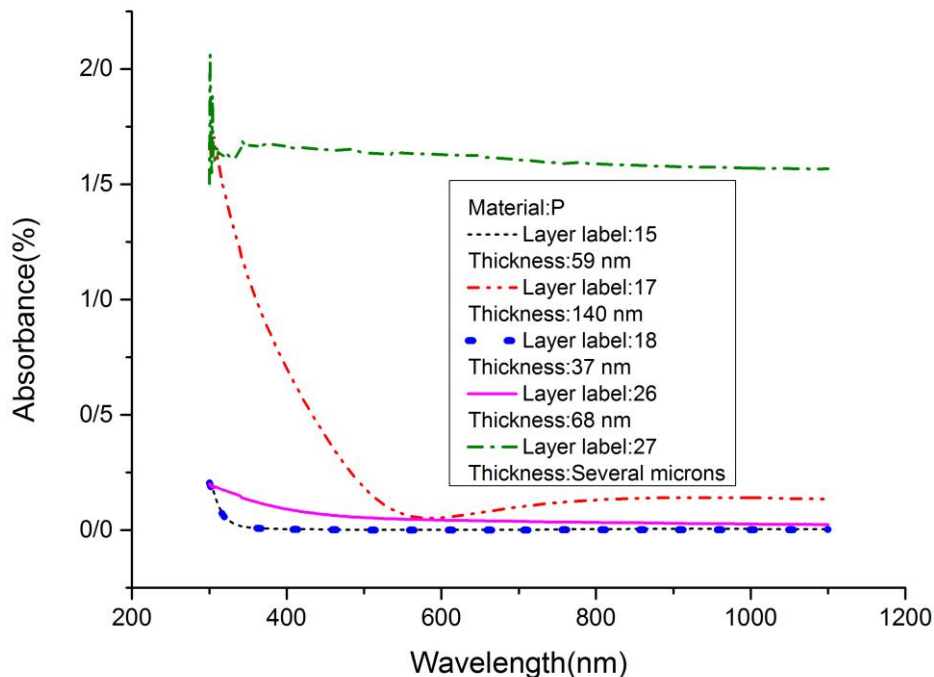
همان گونه که از منحنی های بازتاب سطح سلول پیداست، فسفر میزان بازتاب سطح سلول را کاهش داده است، و ضخامت های بیشتر فسفر میزان بازتاب را بیشتر کاهش می دهند. کاهش میزان بازتاب سطح سلول در ناحیه ای که سلول عکس العمل طیفی خوبی دارد رخ داده است و این خود باعث افزایش بازده سلول می شود. حال باید دید که آیا عامل اصلی افزایش بازده سلول کاهش بازتاب سطح آن است یا پدیده ی دیگری در میان است؟. در ادامه نمودارهای عبور و جذب لایه های فسفر با ضخامت های مختلف آورده شده است.



شکل ۴-۲۷ نمودار میزان عبور لایه های فسفر با ضخامت های مختلف

با توجه به نمودار ملاحظه می گردد که میزان عبور لایه ی فسفر، مخصوصا در ناحیه ی فرابنفش، در ضخامت های بیشتری از این لایه کمتر است. لایه ی شماره ی ۲۷ به روش شیمیایی تهیه شده است، به این صورت که فسفر در اتانول حل شده و محلول حاصل روی لامل شیشه ای و سلول خورشیدی به صورت یکنواخت پخش شده است، لایه ی حاصل، لایه ی ضخیمی از فسفر با ضخامتی در حد چند میکرومتر است. همان طور که پیشتر عنوان شد ملاحظه می شود در ضخامت های بالا لایه ی فسفر عبور در ناحیه ی مرئی و نزدیک مادون قرمز را کاهش می دهد که خود عامل کاهش بازده سلول در ضخامت های بالای فسفر می تواند باشد. در شکل ۴-۲۸ نمودار جذب لایه های فسفر با ضخامت های مختلف آمده است. با توجه به نمودار مشخص است میزان جذب لایه های فسفر، مخصوصا در ناحیه ی فرابنفش، همچنین در ضخامت های بیشتری از این لایه بیشتر است. حال باید دید برای این بخش از

طیف که جذب لایه شده است چه اتفاقی افتاده است؟ و آیا این مقدار جذب در افزایش بازده سلول تاثیر داشته است و این تاثیر چگونه است؟.



شکل ۴-۲۸ نمودار میزان جذب لایه های فسفر با ضخامت های مختلف

۴-۳-۱ لایه نشانی اکسید روی به عنوان لایه ی کاهنده ی بازتاب روی سلول

خورشیدی سیلیکونی

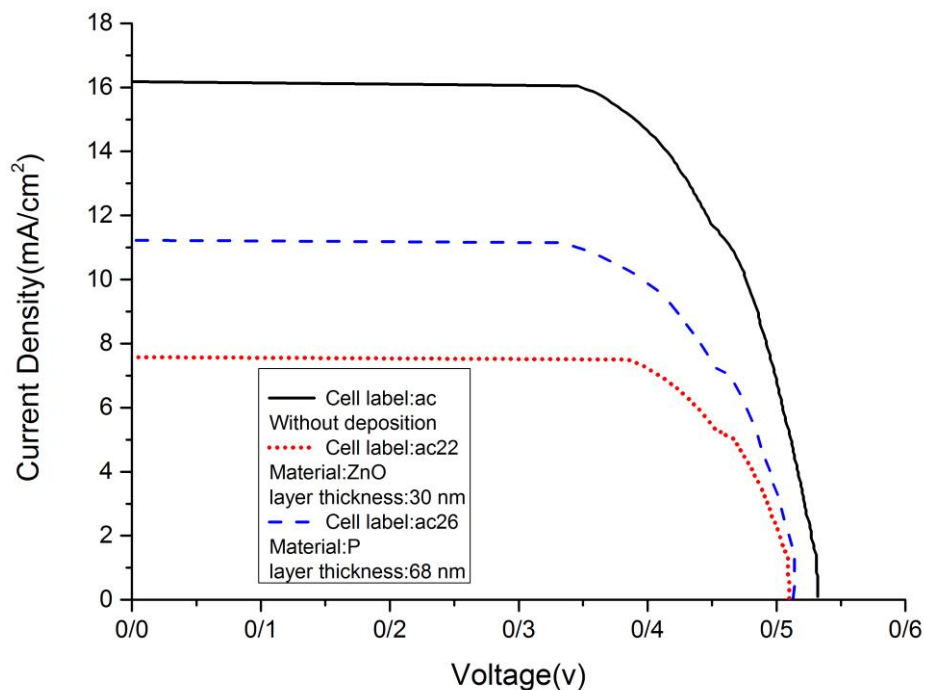
برای بررسی این که آیا کاهش بازتاب سطح سلول بر افزایش بازده تاثیر داشته است یا جذب لایه ی فسفر در ناحیه ی فرابنفش عامل افزایش بازده بوده است، روی سلول با برچسب ac ، ماده ی ZnO که خاصیت کاهنده ی بازتاب دارد [۵۶، ۶۷]، با ضخامت ۳۰ نانومتر، لایه نشانی شد تا بررسی شود که آیا افزایش بازده با ZnO اتفاق خواهد افتاد یا خیر، و نتیجه این بود که ZnO بازده را کاهش داد. مشخصات سلول ac قبل و بعد لایه نشانی در جدول ۴-۶ آمده است. بعد لایه نشانی ZnO سلول با برچسب ac22

مشخص شده است. برای لایه نشانی از پودر اکسید روی با چگالی 5.61 g/cm^3 و خلوص ۹۹ درصد استفاده شد و اکسید روی به روش تبخیر حرارتی فیزیکی لایه نشانی شد.

جدول ۴-۶ مشخصات و بازده سلول ac قبل و بعد از هر لایه نشانی

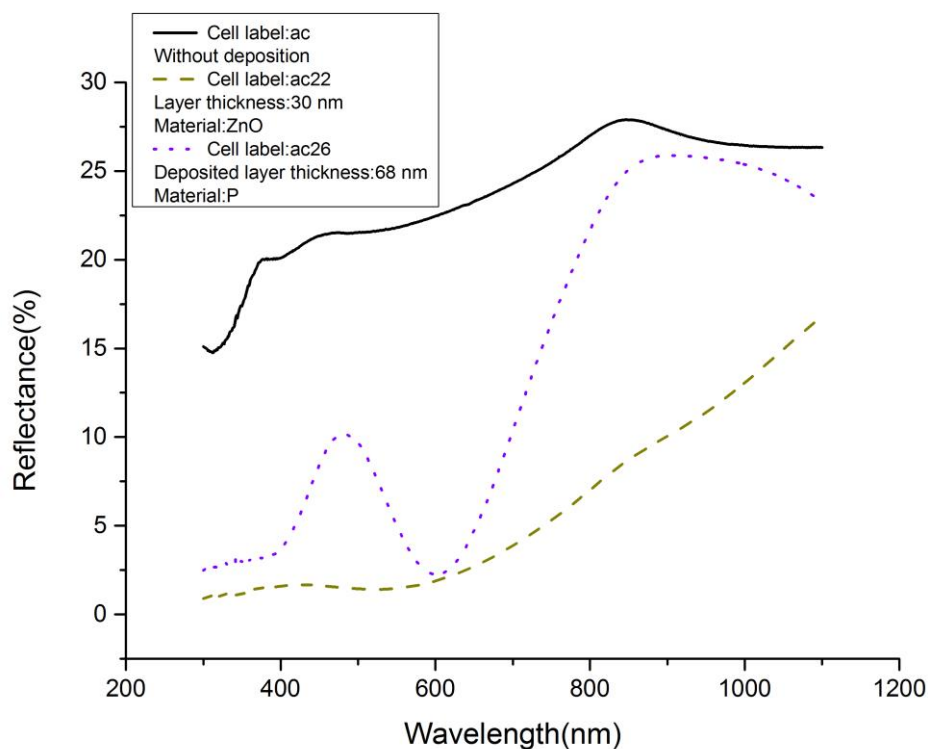
نام سلول	$V_{mp}(v)$	$J_{mp}(\frac{mA}{cm^2})$	بازده (%)	میزان تغییر بازده (%)	ضخامت لایه (mm)	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	ضریب انباشت	جنس لایه
ac	0/39	14/88	5/86		0	0/54	16/18	0/68	
ac22	0/40	7/30	2/90	-2/96	30	0/51	7/58	0/75	ZnO
ac26	0/40	10/03	3/97	1/07	68	0/52	11/23	0/69	P

نمودار چگالی جریان-ولتاژ این سلول در شکل ۴-۲۹ آمده است.



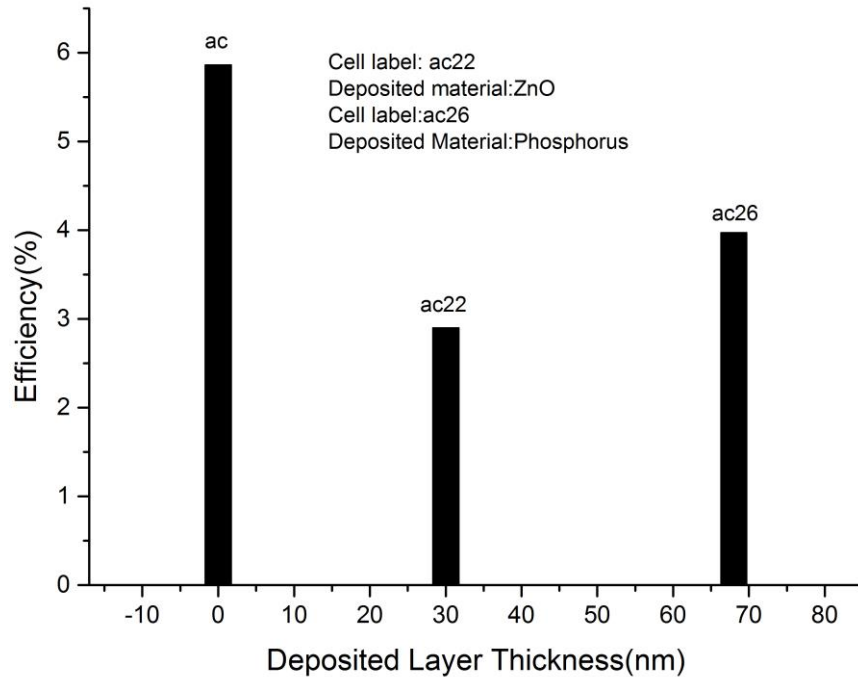
شکل ۴-۲۹ نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول ac

بازتاب سطح سلول اندازه گیری شد و معلوم شد که لایه ی ZnO میزان بازتاب سطح سلول را کاهش داده است. نمودار بازتاب سطح این سلول در شکل ۴-۳۰ آمده است. سپس روی این لایه ی ZnO مجدداً یک لایه ی فسفر با ضخامت ۶۸ نانومتر لایه نشانی شد و با اندازه گیری بازده سلول مشخص شد بازده افزایش یافته است. نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول بعد از لایه نشانی فسفر در شکل ۴-۲۹ آمده است و مشخصات سلول بعد از لایه نشانی فسفر در جدول ۴-۶ آمده است، سلول بعد از لایه نشانی فسفر با برچسب ac26 مشخص شده است. با اندازه گیری مجدد بازتاب سطح سلول ac26 مشخص شد که لایه ی فسفر میزان بازتاب سطح سلول را نسبت به قبل افزایش داده است. که در شکل ۴-۳۰ قابل رویت است. حال که لایه ی اکسید روی علی رغم کاهش بازتاب سطحی سلول بازده سلول را کاهش داده است و فسفر علی رغم افزایش بازتاب سطحی سلول بازده آن را افزایش داده است، بنابراین تغییر بازتاب سطحی سلول توسط فسفر عامل اصلی افزایش بازده سلول نمی تواند باشد و لومینسانس فسفر عامل اصلی افزایش بازده سلول است.



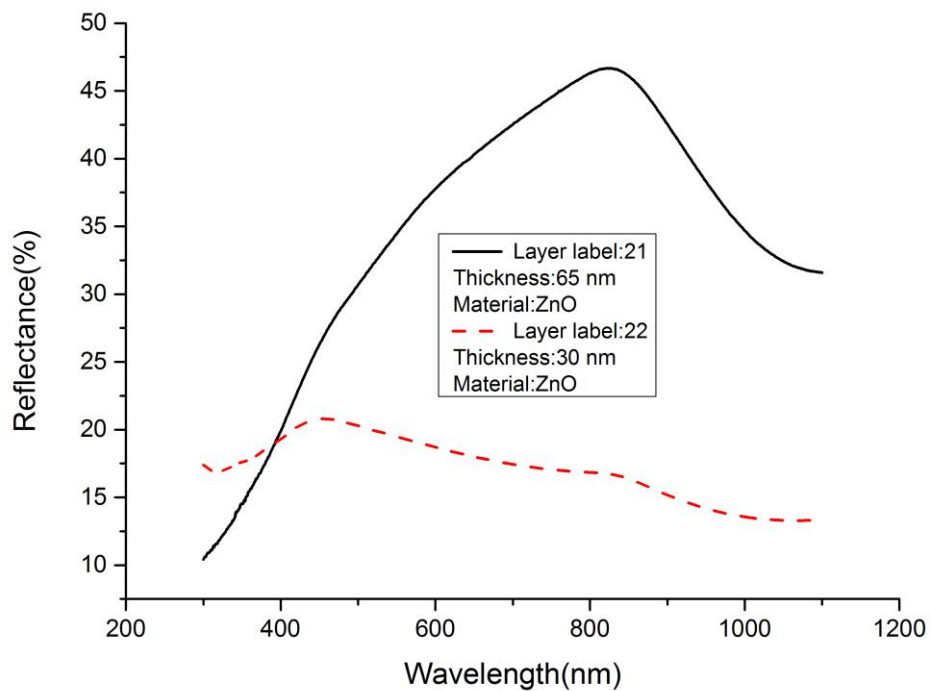
شکل ۴-۳۰ نمودار بازتاب سطح سلول ac

در شکل ۴-۳۱ نموداری از بازده سلول ac بعد از لایه نشانی اکسید روی و فسفر روی آن رسم شده است.

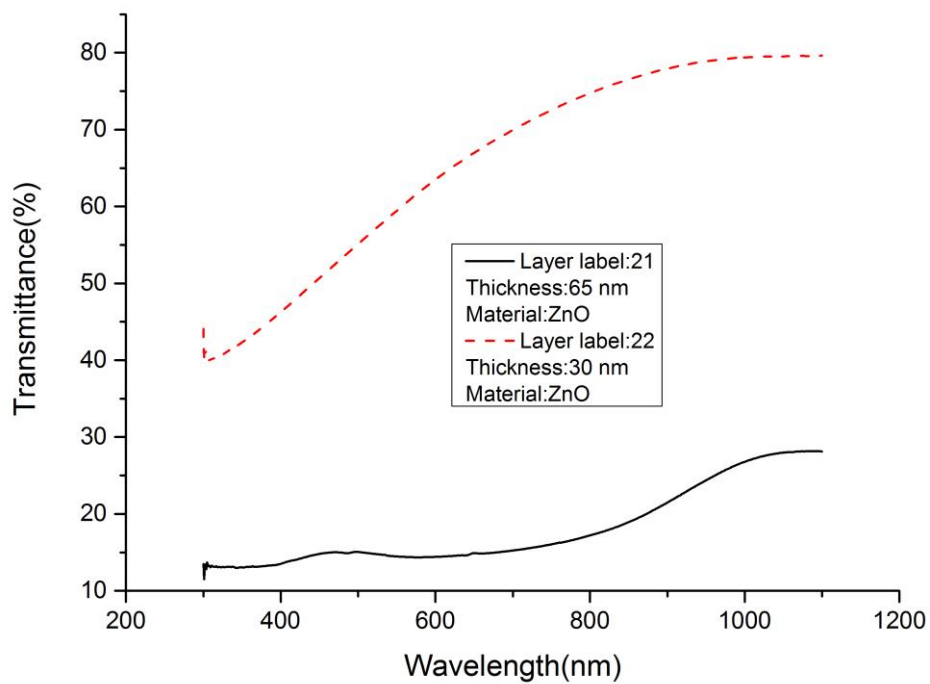


شکل ۴-۳۱ نمودار بازده سلول ac برحسب لایه های روی آن

در شکل ۴-۳۲ نموداری از بازتاب سطحی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف آمده است. ملاحظه می شود که لایه ی با ضخامت ۳۰ نانومتر بازتاب را در ناحیه ی مرئی و همچنین تا طول موج حدود ۱۰۰۰ نانومتر بیشتر از لایه ی با ضخامت ۶۵ نانومتر کاهش داده است و این مسئله برای سلول خورشیدی مطلوب است به همین دلیل در این پروژه روی سلول خورشیدی سیلیکونی مقدار ۳۰ نانومتر اکسید روی لایه نشانی کردیم. در شکل ۴-۳۳ نموداری از عبور اپتیکی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف آمده است.

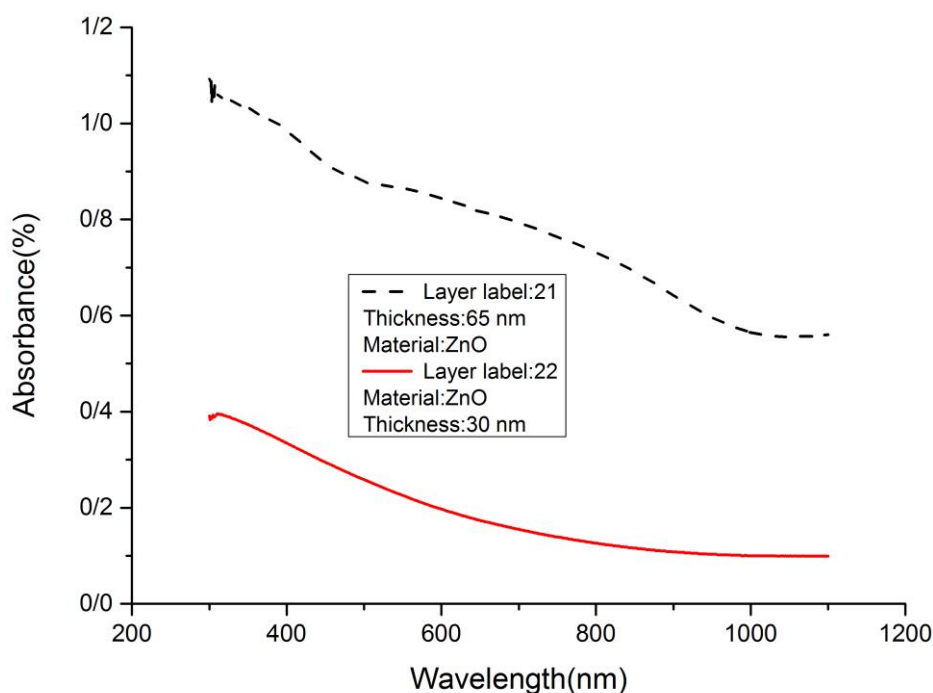


شکل ۳۲-۴ نموداری از بازتاب سطحی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف



شکل ۳۳-۴ نموداری از عبور اپتیکی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف

با توجه به نمودار عبور اپتیکی مشخص است که لایه ی اکسید روی ضخیم تر میزان عبور اپتیکی را بیشتر کاهش داده است. کاهش عبور اپتیکی در ناحیه ی طیف مرئی و همچنین تا طول موج حدود ۱۰۰۰ نانومتر توسط لایه ی با ضخامت ۳۰ نانومتر نیز قابل مشاهده است و این مسئله برای سلول خورشیدی مطلوب نیست، چون سلول خورشیدی سیلیکونی در نواحی مذکور جذب و عکس العمل طیفی خوبی دارد. در شکل ۴-۳۴ نموداری از جذب اپتیکی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف آمده است.



شکل ۴-۳۴ نموداری از جذب اپتیکی دو نمونه لایه ی اکسید روی لایه نشانی شده با ضخامت های مختلف

با توجه به نمودار جذب اپتیکی اکسید روی قابل مشاهده است که لایه اکسید روی با ضخامت ۶۵ نانومتر بیشتر از لایه ی با ضخامت ۳۰ نانومتر در ناحیه ی مرئی و تا طول موج حدود ۱۰۰۰ نانومتر جذب اپتیکی دارد و این مسئله باعث می شود لایه ی با ضخامت ۳۰ نانومتر برای لایه نشانی روی سلول خورشیدی مناسب تر به نظر برسد چون در نواحی مذکور عکس العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی مناسب است و جذب پرتو توسط اکسید روی مانع رسیدن پرتوی بیشتر به سلول خواهد شد.

بنابراین دلیل کاهش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی با برچسب ac ، بعد از لایه نشانی اکسید روی علی رغم کاهش بازتاب سطحی سلول را می توان به کاهش عبور و افزایش جذب پرتو توسط لایه ی اکسید روی در ناحیه ای که سلول عکس العمل طیفی خوبی دارد نسبت داد.

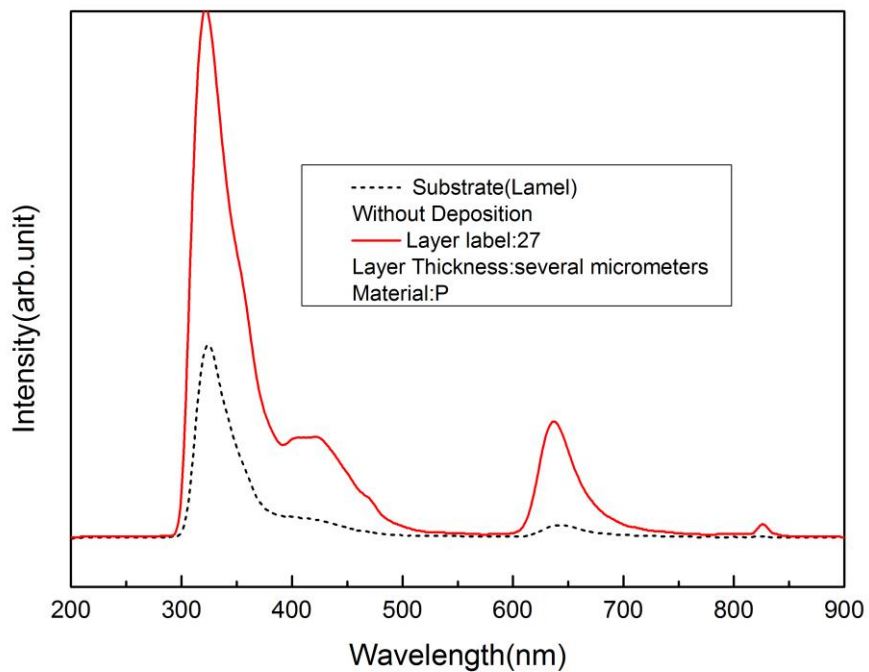
۴-۴ نتایج آنالیز فتولومینسانس

با منتفی بودن تاثیر کاهش میزان بازتاب سطح سلول در اثر لایه نشانی فسفر بر روی افزایش بازده سلولها، بررسی اثر جذب لایه ی فسفر بر روی بازده سلول مورد توجه قرار می گیرد. برای این منظور از لایه ی ۲۷ و ۱۷ فسفر، آنالیز فتولومینسانس به عمل آمد. لایه های ۲۷ و ۱۷ به ترتیب شامل ضخامت های چندین میکرومتر و ۱۴۰ نانومتر از فسفر می باشند.

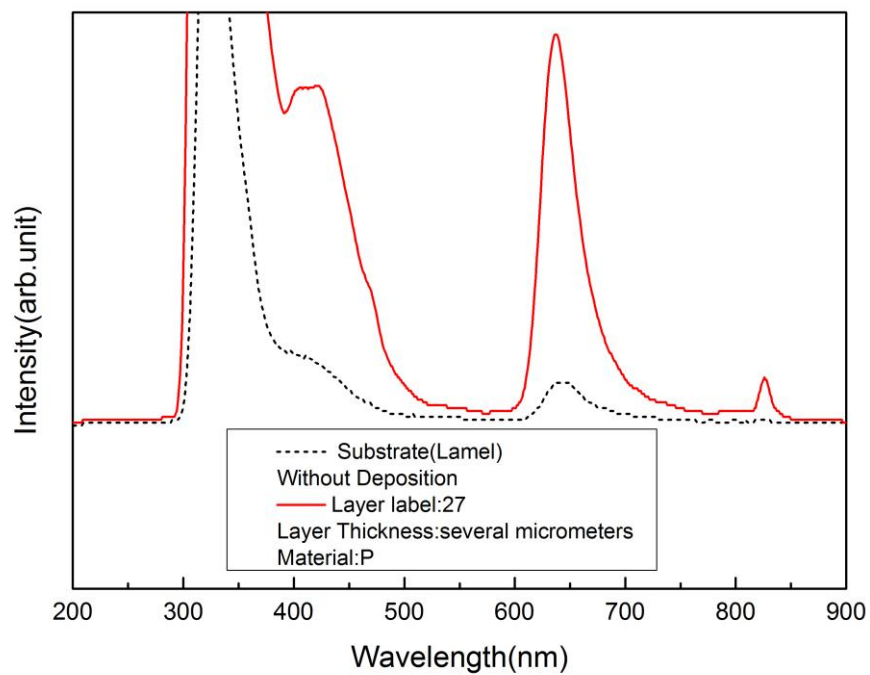
و نتیجه در شکل های ۴-۳۵، ۴-۳۶ و ۴-۳۷ آمده است. در این شکل ها طیف فتولومینسانس زیرلایه-ی (لامل شیشه ای) بدون لایه نشانی هم آورده شده است و از مقایسه ی آن با طیف فتولومینسانس لایه ی فسفر می توان پی برد که لایه ی فسفر در چه طول موج هایی گسیل دارد.

از شکل ۴-۳۶ می توان فهمید که فسفر در طول موج حدود ۸۲۶ بیشینه ی گسیل را دارد و همچنین در محدوده ی ۳۹۱ تا ۵۵۰ نانومتر گسیل دارد که بیشینه ی آن در محدوده ی ۴۰۱ تا ۴۲۶ نانومتر است، و از شکل ۴-۳۷ می توان فهمید که فسفر در طول موج های محدوده ی ۳۹۱ تا ۵۵۰ نانومتر گسیل دارد که بیشینه ی آن در محدوده ی ۳۹۱ تا ۴۲۳ نانومتر است.

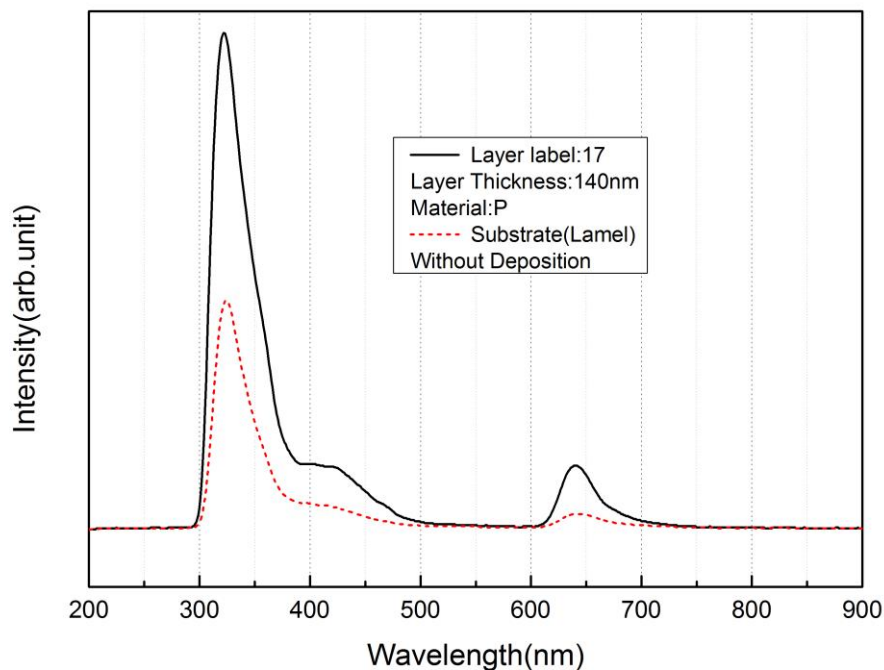
با توجه به شکل ۴-۱، در محدوده های گسیل مذکور عکس العمل طیفی سلول خورشیدی نسبت به ناحیه ی فرابنفش بالاتر است، این خود باعث افزایش بازده سلول خورشیدی می شود.



شکل ۴-۳۵ طیف فتولومینسانس لایه ی ۲۷ و زیر لایه ی بدون لایه نشانی



شکل ۴-۳۶ طیف فتولومینسانس لایه ی ۲۷ و زیر لایه ی بدون لایه نشانی در مقیاس متفاوت

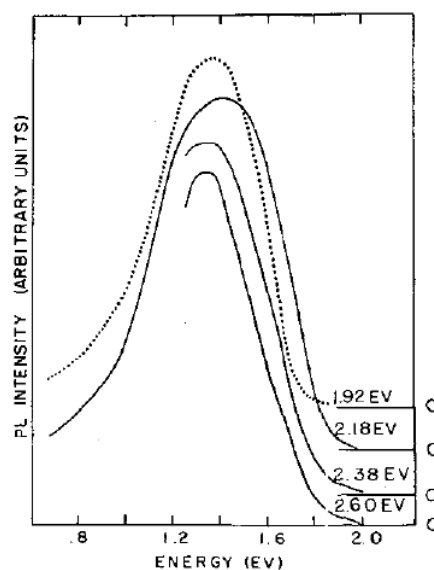


شکل ۴-۳۷ طیف فتولومینسانس لایه ی ۱۷ و زیرلایه ی بدون لایه نشانی

در شکل ۴-۳۸ نمودار فتولومینسانس فسفر قرمز بی شکل و حجمی^{۲۳} با طول موجهای برانگیزش
 645nm(1.92eV), 568nm(2.18 eV), 521nm(2.38 eV), 476nm(2.6 eV)
 مشاهده می شود که در طول موجهای 892nm(1.39 eV), 861nm(1.44 eV), 898nm(1.38),
 918nm(1.35 eV) منحنی های گسیل قله دارند. این طول موج های برانگیزش و محل قله های گسیل
 متناظر آنها در جدول ۴-۷ آورده شده است [۱].

جدول ۴-۷ طول موج های برانگیزش و قله های گسیل متناظر آنها برای فسفر قرمز بی شکل حجمی

طول موج برانگیزش (nm)	محل قله گسیل (nm)
۶۴۵	۸۹۲
۵۶۸	۸۶۱
۵۲۱	۸۹۸
۴۷۶	۹۱۸

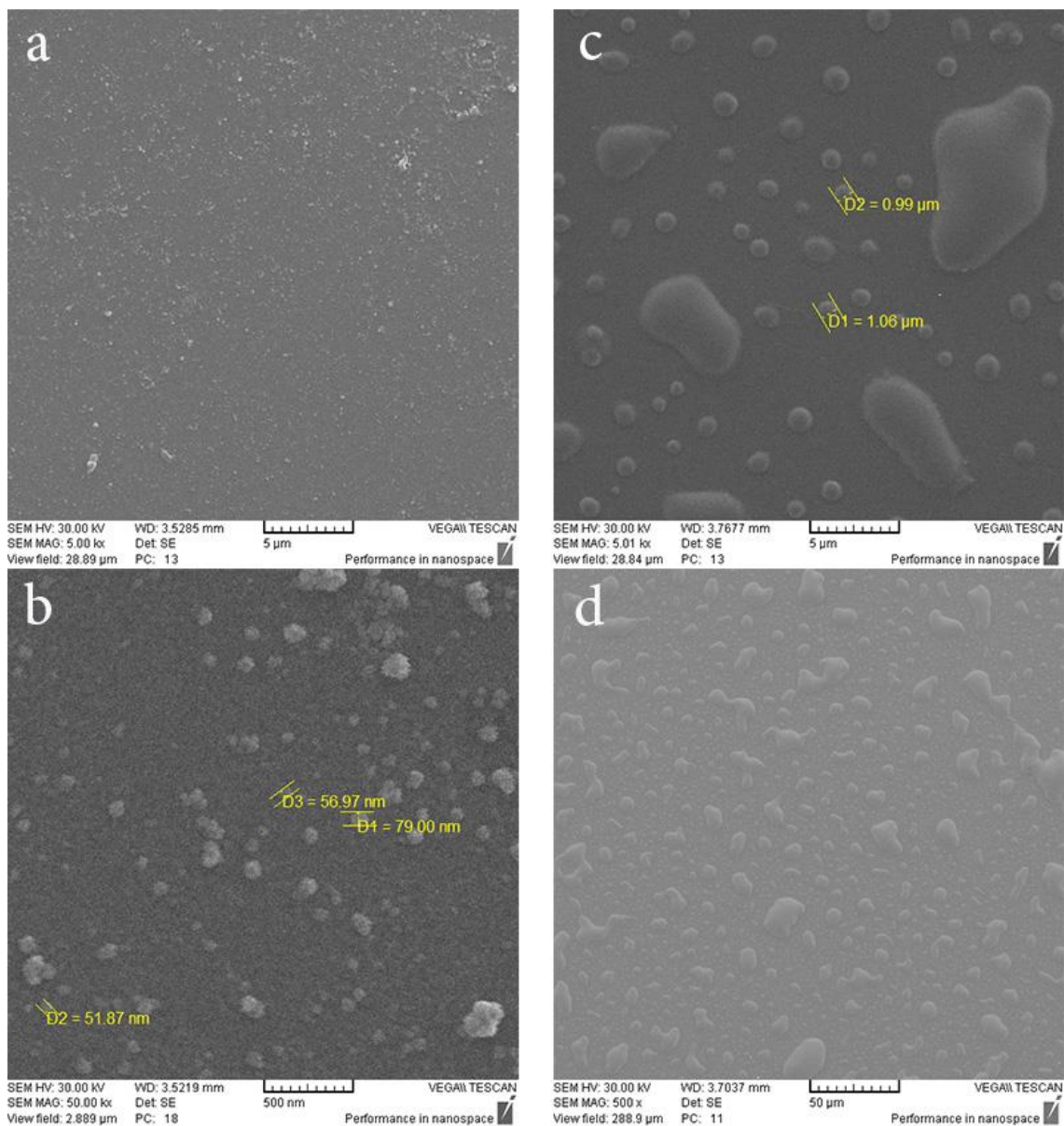


شکل ۴-۳۸ طیف فتولومینسانس فسفر قرمز بی شکل حجمی که با چهار طول موج برانگیزش متفاوت تهیه شده است. سطوح شدت صفر با خطوط افقی در سمت راست شکل نشان داده شده است [۱]

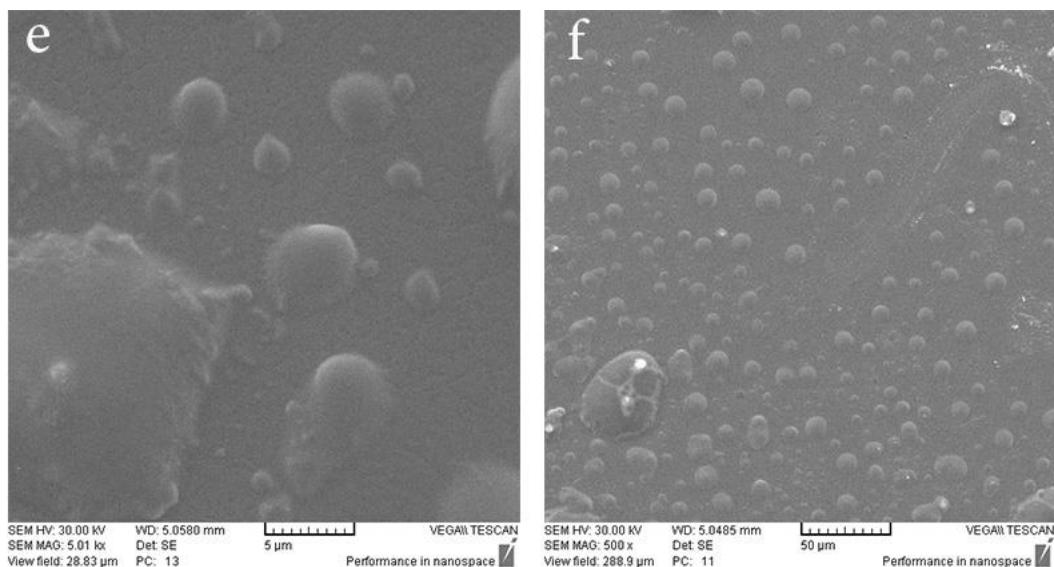
با مقایسه ی طیف فتولومینسانس فسفر قرمز بی شکل حجمی با فسفر قرمز لایه نشانی شده روی سلول خورشیدی سیلیکونی، متوجه می شویم که قله های گسیل در طیف فسفر قرمز لایه نشانی شده مکان های متفاوتی نسبت به قله های طیف فسفر حجمی دارند.

۴-۵ نتایج آنالیز تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM)

آنالیز SEM از سطح نمونه های، لامل شماره ی ۱۲ حاوی فسفر با ضخامت ۲۱ نانومتر، لامل شماره ی ۱۳ حاوی فسفر با ضخامت ۴۱ نانومتر و سلول I که روی سطح آن فسفر با ضخامت ۸۲ نانومتر لایه نشانی شده است، تهیه شده و در شکل ۴-۳۹ و ۴-۴۰ آمده است.



شکل ۳۹-۴ تصویر SEM از سطح نمونه های، لامل شماره ۱۲ حاوی فسفر با ضخامت ۲۱ نانومتر (a,b)، لامل شماره ۱۳ حاوی فسفر با ضخامت ۴۱ نانومتر (c,d)



شکل ۴-۴۰ تصویر SEM از سطح سلول I که روی سطح آن فسفر با ضخامت ۸۲ نانومتر لایه نشانی شده است (e,f)

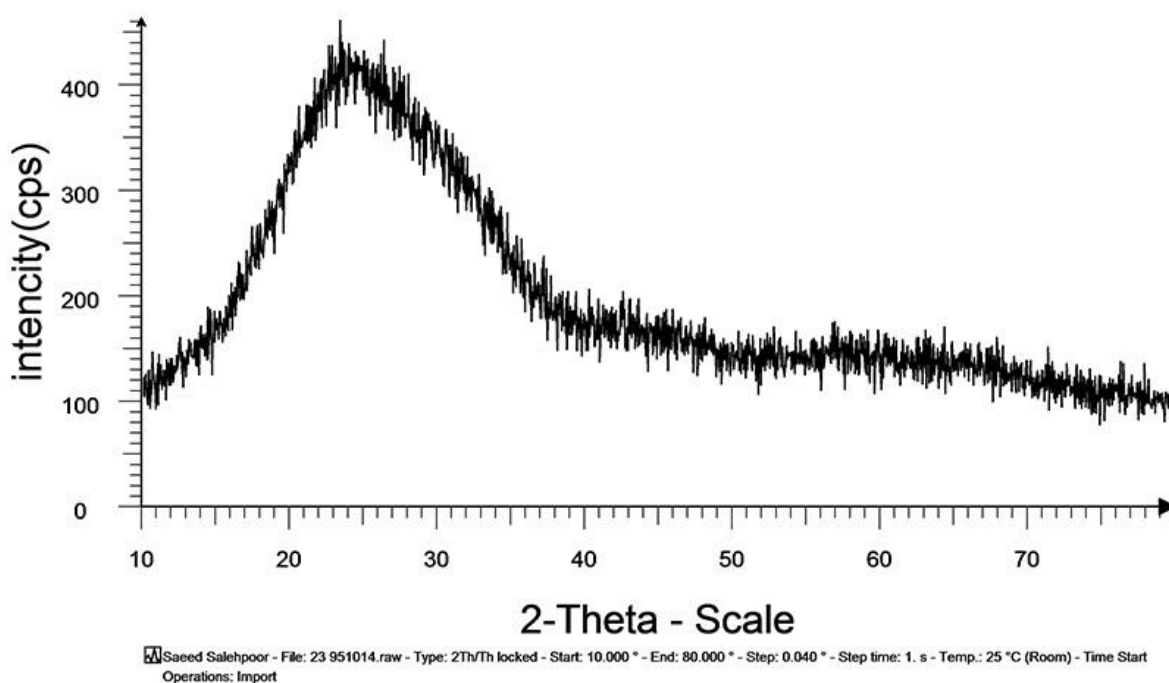
مشاهده می شود که لایه ی یکنواخت فسفر تشکیل نشده است و فسفر در نقاطی تجمع نموده و محدوده هایی با قطر های مختلف را تشکیل داده است، در لایه ی ۲۱ نانومتری قطر این نقاط در حدود ۵۰ تا ۸۰ نانومتر است. در لایه ی ۴۱ نانومتری قطر این نقاط به حدود یک میکرومتر می رسد و در لایه ی ۸۲ نانومتری که مربوط به لایه ی روی سطح سلول I می باشد قطر این نقاط به حدود ۳ تا ۵ میکرومتر می رسد، پس واضح است که با افزایش ضخامت لایه نشانی فسفر قطر نقاط فسفر افزایش یافته است. البته بین نقاط مذکور احتمال وجود ذرات فسفر با اندازه های بسیار کمتر در حد چند نانومتر نیز وجود دارد.

تجمع فسفر به صورت نقاط روی سطح سلول باعث می شود که نور علاوه بر برخورد به نقاط فسفر به طور مستقیم، از بین نقاط فسفر و با مانع کمتر نیز بتواند به سطح سیلیکون برسد، بدین ترتیب بخشی از بازده مربوط به نور گسیلی از نقاط فسفر است و بخشی دیگر مربوط به نوری است که از بین نقاط عبور کرده و مستقیماً به سطح سیلیکون رسیده است. هرچه ضخامت لایه ی فسفر بیشتر شود نقاط فسفر بزرگتر شده و کم کم تمام سطح را می پوشانند همچنین با افزایش ضخامت لایه ی فسفر میزان

جذب فسفر در ناحیه ی مرئی افزایش می یابد که باعث کاهش بازده سلول می شود این نشان می دهد لایه نشانی فسفر تا حدی باعث افزایش بازده خواهد شد که فسفر تمام سطح را نپوشاند و بخشی از نور تابشی بتواند مستقیماً و با مانع کمتر به سطح سلول برسد و بخشی به نقاط فسفر برخورد کند و باعث ایجاد گسیل در اثر پدیده ی فتولومینسانس در آن شود.

۴-۶ نتایج آنالیز پراش اشعه ی ایکس (XRD)

از لایه ی فسفر شماره ی ۲۳ با ضخامت ۸۴ نانومتر آنالیز پراش اشعه ی ایکس به عمل آمد و نتیجه در شکل ۴-۴ آمده است.



شکل ۴-۴ نتیجه ی آنالیز پراش اشعه ی ایکس (XRD) لایه ی فسفر با ضخامت ۸۴ نانومتر

با توجه به نتیجه ی آنالیز مشخص است که لایه ی فسفر ساختار بی شکل دارد و این مسئله با توجه به تصاویر SEM قابل توجیه است چون در تصویر SEM مشاهده شد که لایه ی یکدستی تشکیل نشده است و صرفاً نقاطی از فسفر با فاصله از هم قرار گرفته اند.

نتیجه گیری

با توجه به مزایای قابل توجه انرژی خورشیدی از جمله رایگان بودن و پاک بودن و تجدید پذیر بودن آن که در برابر هزینه‌ی زیاد، آلودگی، تولید گازهای گلخانه‌ای و تجدید ناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی قرار دارد، استفاده از انرژی خورشید امروزه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. فناوری‌های مختلفی از سلول خورشیدی تا کنون شکل گرفته است، و عامل شکل‌گیری این فناوری‌های مختلف افزایش بازده سلول از یک سو و از سوی دیگر کاهش هزینه‌ی تولید سلول می‌باشد.

سلولهای خورشیدی سیلیکونی یکی از نسلهای سلول خورشیدی هستند که بسیار رایج و مورد استفاده اند و با وجود تولید نسل‌های جدید سلول خورشیدی این دسته از سلولها هنوز بخش بزرگی از بازار مصرفی سلول خورشیدی را به خود اختصاص داده اند، از این رو افزایش بازده این دسته از سلولها به لحاظ کاربرد و صرفه‌ی اقتصادی می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد.

در این پروژه یکی از عوامل بازده پایین سلول خورشیدی سیلیکونی بررسی شده است و برای رفع این مشکل راهکاری ارائه شده است و با استفاده از این راهکار بازده سلول‌های خورشیدی سیلیکونی افزایش یافته است.

با بررسی عوامل بازده پایین سلول مشخص شد، که عکس‌العمل طیفی ضعیف سلول در ناحیه‌ی فرابنفش عاملی برای بازده پایین سلول است، در حالی که شدت تابش در این ناحیه بر اساس منحنی توزیع طیفی شدت تابش خورشید، زیاد است و نور فرابنفش دارای انرژی زیادی هست و توانایی کم سلول برای جذب این پرتو باعث بازده پایین در سلول است. برای رفع این نقیصه در این پروژه از مواد با خاصیت لومینسانس استفاده شد به گونه‌ای که ماده‌ی دارای این خاصیت با تحریک توسط نور فرابنفش در ناحیه‌ی مرئی و مادون قرمز گسیل داشته باشد و چون سلول خورشیدی سیلیکونی در ناحیه‌ی مذکور عکس‌العمل طیفی بالایی دارد، این پدیده باعث افزایش بازده سلول خواهد گردید. ماده‌ی مورد استفاده در این پروژه فسفر قرمز است، این ماده توسط روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی

فیزیکی روی سلول خورشیدی تک بلوری لایه نشانی گردید و بعد از لایه نشانی با ضخامت های مختلف شاهد افزایش بازده سلول بعد از هر لایه نشانی بودیم، در انتخاب مواد و روش های لایه نشانی سعی گردید به ارزان بودن مواد و روش ها توجه شود تا پروژه هرچه بیشتر کاربردی باشد. با توجه به دست آورد های این پروژه امید است که باشیوه های لایه نشانی ارزان قیمت می توان استفاده از سلولهای خورشیدی را بیش از پیش اقتصادی نمود.

پیشنهادات جهت مطالعه و پژوهش های تکمیلی

با توجه به تحقیقات انجام شده در این پروژه و دست یابی به نتایج ارزشمند، مواردی وجود دارد که نویسنده به علاقمندان این حوزه برای پژوهش پیشنهاد می کند.

- ۱- بررسی روش استفاده شده برای افزایش بازده در این پروژه روی سایر سلول های خورشیدی
- ۲- استفاده از روش های لایه نشانی دیگر برای لایه نشانی فسفر قرمز روی سلول های خورشیدی
- ۳- استفاده از مواد دیگر برای لایه نشانی در ترکیب با فسفر به عنوان آلایش
- ۴- استفاده از سایر مواد نظیر لانتانیدها به عنوان ماده ی دارای خاصیت لومینسانس و مبدل طیف

پیوست الف

سننز لایه های نازک به روش تبخیر حرارتی فیزیکی

روش های سننز لایه های نازک به طور کلی به دو دسته ی : روش های فیزیکی و روش های شیمیایی تقسیم می شوند.

تبخیر حرارتی فیزیکی جزو روش های فیزیکی سننز لایه های نازک می باشد. در لایه نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی سه مرحله ی اساسی وجود دارد.

۱-تبخیر ماده ی مورد نظر جهت لایه نشانی

۲-انتقال ماده ی تبخیر شده به زیر لایه ای که لایه نشانی روی آن انجام خواهد شد.

۳-چگالش ماده ی تبخیر شده روی زیرلایه ی مورد نظر و تشکیل لایه ی نازک

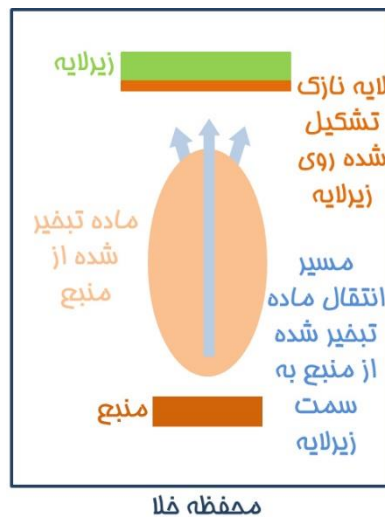
تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی یکی از انواع روشهای تبخیر حرارتی فیزیکی است که اینجا بررسی خواهد شد. در این روش ماده ی مورد نظر برای تبخیر در یک بوتله که در واقع نوعی مقاوت الکتریکی است قرار می گیرد و جریان الکتریکی از بوتله عبور می کند و با گرم شدن بوتله منجر به تبخیر ماده ی مورد نظر می شود. به دلیل اختلاف فشار در محل تبخیر و محل زیرلایه ها ماده ی تبخیر شده به سمت زیرلایه حرکت می کند و روی زیرلایه دچار چگالش می شود و لایه ی نازکی تشکیل می دهد.

لایه نشانی به دلایلی که در ادامه می آید در محیط خلاء انجام می شود :

-برای اینکه لایه های بدست آمده کیفیت بهتری داشته باشند و خلوص بیشتر داشته باشند.

-چون دمای تبخیر برای لایه نشانی بالا است و احتمال اکسید شدن مواد فلزی در مجاورت اکسیژن هوا زیاد است.

-وجود مواد و مولکول های دیگر در هوا و در مسیر تبخیر و لایه نشانی باعث کاهش سرعت لایه نشانی و مانع تشکیل لایه های با چگالی بیشتر می شود. در شکل ۱-پیوست الف طرحی از مراحل تشکیل لایه ی نازک در روش تبخیر حرارتی فیزیکی آمده است.



شکل ۱-پیوست الف طرحی از مراحل تشکیل لایه ی نازک در روش تبخیر حرارتی فیزیکی [۶۸]

بوته هایی که برای تبخیر مورد استفاده قرار می گیرند معمولاً از جنس تنگستن، مولیبدن، تانتالیوم و... است. ماده ی بوته باید ویژگی هایی داشته باشد که می توان چنین برشمرد:
-نقطه ی ذوب بالا داشته باشد.

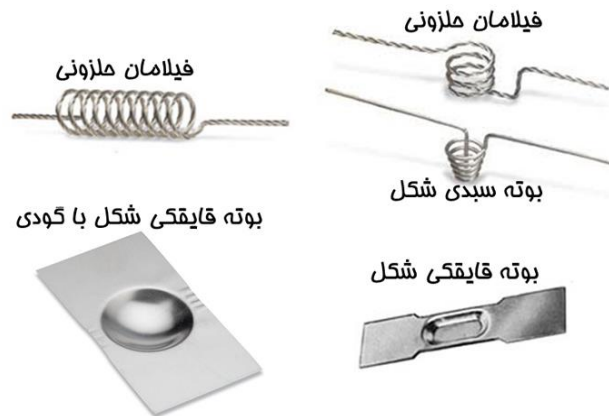
-قابل حل در ماده ی منبع نباشد تا با آن ترکیب نشود.

-در برابر شوک حرارتی مقاوم باشد و ماده ی مورد تبخیر بتواند بوته را مرطوب^{۲۴} کند.

-در برابر گازهای ایجاد شده در محیط واکنش ندهد.

^{۲۴} wet

بوته ها در اشکال مختلفی تهیه می شوند که بعضی از ورق و بعضی دیگر از سیم های در هم تنیده تهیه می شوند. در شکل ۲- پیوست الف چند نمونه از بوته ی مورد استفاده در روش تبخیر حرارتی فیزیکی آمده است.



شکل ۲- پیوست الف چند نمونه از بوته ی مورد استفاده در روش تبخیر حرارتی فیزیکی [۶۸]

در یک دمای خاص فشار بخاری که از یک ماده به وجود می آید فشار بخار تعادلی آن ماده نامیده می شود. در روش تبخیر حرارتی فشار بخار ماده ی مورد تبخیر باید در دمایی که از طرف بوته به آن اعمال می شود مقدار مناسبی باشد. با استفاده از منحنی فشار بخار هر ماده و با توجه به فشاری که در محفظه ی تبخیر وجود دارد می توان به دمای مورد نیاز برای تبخیر ماده ی مورد نظر دست یافت [۶۹].

در شکل ۳- پیوست الف طرحی از محفظه ی خلاء و اجزای آن آمده است که در ادامه این اجزاء معرفی می شوند.

Vacuum chamber: محفظه ی خلاء

Substrate holder: نگهدارنده ی زیرلایه

Substrate: زیرلایه

Source: منبع تبخیر

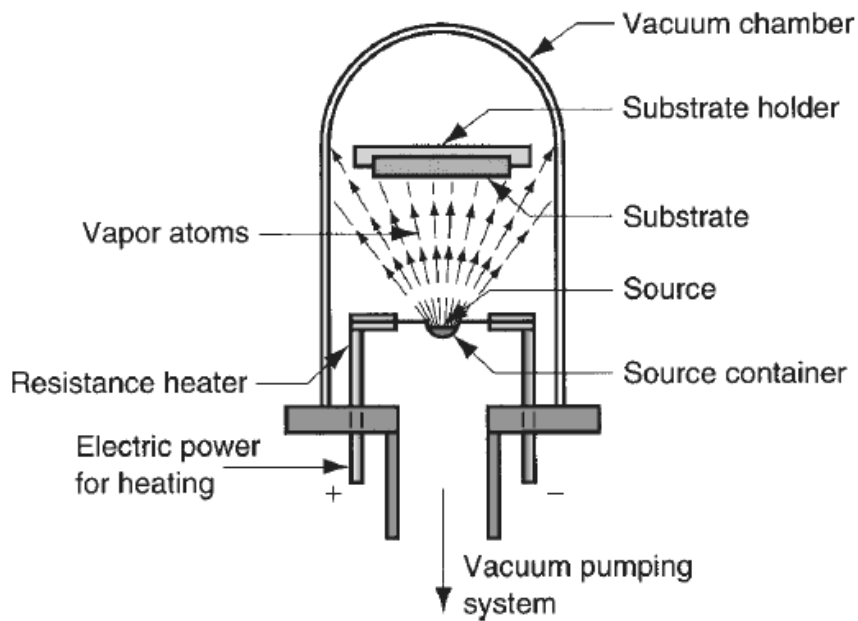
Source container: نگهدارنده ی منبع تبخیر

Vacuum pumping system: سیستم خلاء

Vapor atoms: اتم های بخار

Resistance heater: گرم کننده ی مقاومت

Electric power for heating: توان الکتریکی برای گرم کردن مقاومت الکتریکی



شکل ۳- پیوست الف طرحی از محفظه ی خلاء در روش تبخیر حرارتی فیزیکی [۷۰]

تعریف پدیده ی فتولومینسانس و مواد با خاصیت لومینسانس

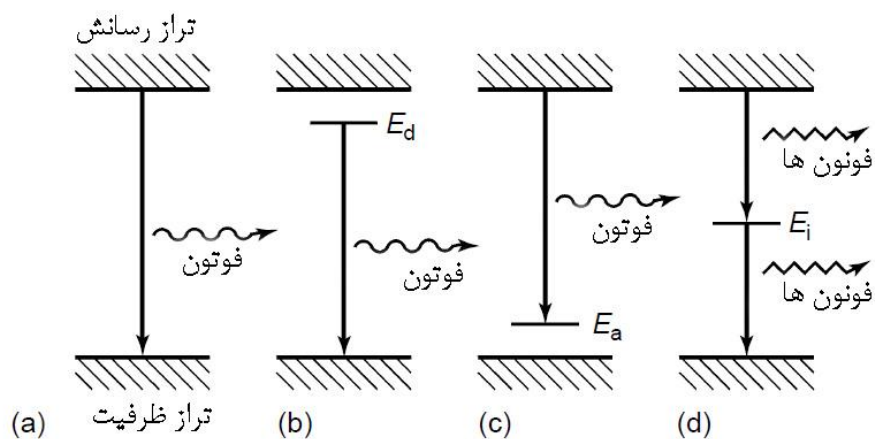
هرگونه تابش نور از یک جسم که منشاء تابش جسم سیاه و انعکاس را نداشته باشد لومینسانس نامیده می‌شود. جهت ایجاد تابش در یک جسم ابتدا باید انرژی لازم به الکترون های بلور داده شود تا از تراز ظرفیت به تراز رسانش رفته و تولید زوج الکترون-حفره نمایند و بعد با بازترکیب این زوج فوتون ساطع می‌شود که به آن لومینسانس گفته می‌شود. اگر عامل تحریک جسم نور باشد به لومینسانس جسم فتولومینسانس گفته می‌شود و اگر عامل تحریک میدان الکتریکی، جریان الکترونی، گرما، فرآیندهای شیمیایی، امواج صوتی و غیره باشد، به ترتیب به آن الکترو لومینسانس، کاتدولومینسانس، ترمولومینسانس، شیمولومینسانس، آکوستولومینسانس و غیره گفته می‌شود.

فتولومینسانس براساس اختلاف زمانی بین دریافت نور و تابش آن به دو دسته تقسیم می‌شود: فلوتورسانس و فسفرسانس، انتشار نور در حین فرایند برانگیختگی و تا 10^{-8} ثانیه بعد از آن را فلوتورسانس و انتشار نور در زمان های بیشتر از زمان مذکور را فسفرسانس می‌نامند.

در مواد نیم رسانا طی پدیده ی فتولومینسانس الکترون با دریافت انرژی از فوتون از تراز ظرفیت به تراز رسانش تغییر مکان می‌دهد و در بازگشت به تراز ظرفیت انرژی خود را به صورت فوتون تابش می‌کند، این شیوهی بازگشت مستقیم از نوار رسانش به ظرفیت، بازترکیب مستقیم^{۲۵} نامیده می‌شود. ممکن است ماده ی نیم رسانا توسط آلاینش یا نقایص صاحب ترازهای اضافه ای شود، مثلا با افزودن ناخالصی بخشنده تراز اضافه ای نزدیک تراز رسانش و بین تراز رسانش و ظرفیت ایجاد می‌گردد، همچنین با افزودن ناخالصی پذیرنده تراز اضافه ای نزدیک تراز ظرفیت و بین تراز ظرفیت و رسانش ایجاد می‌گردد، وجود این ترازها که اصطلاحا تراز تله نامیده می‌شود باعث می‌شود که الکترون در آن ها به دام بیفتد،

^{۲۵} band to band recombination

بعد از بازترکیب می توان با آنالیز انرژی نور گسیلی به انرژی تراز ناخالصی یا نقص پی برد. ترازهای سستی که نزدیک تراز رسانش و ظرفیت ایجاد می شوند بیشتر اوقات در بازترکیب تابشی شرکت می کنند، اما دمای ماده باید به قدر کافی پایین باشد تا حامل ها تشویق به فعالیت گرمایی خارج از تراز تله نشوند. گاف انرژی پهن تمایل به بازترکیب غیر تابشی را به خاطر ایجاد توقفگاه هایی برای الکترون ها بین تراز ظرفیت و رسانش و گسیل فونون توسط آن ها فراهم می آورد. فرایندهای فوق الذکر در شکل ۱ پیوست ب آمده است. در این شکل E_d تراز انرژی بخشنده و E_a تراز انرژی پذیرنده است و E_i تراز میانی است [۷۱].



شکل ۱- پیوست ب (a تا c) مسیرهای بازترکیب تابشی (a) بازترکیب مستقیم (b) از تراز بخشنده به ظرفیت (c) از تراز رسانش به تراز پذیرنده (d) بازترکیب غیر تابشی با تراز میانی

REFERENCES

- .١ Shanabrook, B.V., S.G. Bishop, and P.C. Taylor, 1981, "Photoluminescence and ESR Studies of Localized States in Amorphous Phosphorus", **Le Journal de Physique Colloques**, 42(C4): p. C4-865-C4-868.
- .٢ wurfel, p., 2009, **Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts**. 2nd ed. Wiley.
- .٣ Iranmanesh, S., et al., "Thermal performance enhancement of an evacuated tube solar collector using graphene nanoplatelets nanofluid", **Journal of Cleaner Production**.
- .٤ http://naturaecoenergy.com/product_parabolic_trough.html.
- .٥ Adrian, K., 2011, **principle of solar cells, LEDs and diodes: the role of PN junction**. John Wiley & Sons,Ltd.
- .٦ Antony, F.D., C. Remmers K. H., 2007, **Photovoltaic For Professionals: Solar Electric Systems Marking, Design And Installation**. Routlidge.
- .٧ <http://www.kurzweilai.net/worldwide-annual-solar-pv-installations-will-double-by-2020-says-report>.
- .٨ P.C.Choubey, A.O., R.Dewangan, 2012, "A review: Solar cell current scenario and future trends", **Recent Research in Science and Technology**, 4(8): p. 99-101.

- . 9 Sharma, S., K.K. Jain, and A. Sharma, 2015, "Solar Cells: In Research and Applications—A Review", **Materials Sciences and Applications**, 06(12): p. 1145-1155.
- . 10 Srinivas, B., Balaji, S., Nagendra Babu, M., Reddy, Y.S., 2015, "Review on Present and Advance Materials for Solar Cells.", **International Journal of Engineering Research-Online**, 3: p. 178-182.
- . 11 Dmitrijev, S., 2006, **Principles of Semiconductor Devices**. Oxford University Press.
- . 12 [http://www.ledwatcher.com/solar-panel-basics-and-types-of-solar-panels-used-in-flood-lights./](http://www.ledwatcher.com/solar-panel-basics-and-types-of-solar-panels-used-in-flood-lights/)
- . 13 Saga, T., 2010, "Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production.", **NPG Asia Materials**, 2: p. 96-102.
- . 14 Jayakumar, P., 2009, **Solar Energy Resource Assessment Handbook**. Renewable Energy Corporation Network for the Asia Pacific.
- . 15 Chopra, K.L., Paulson, P.D. , Dutt, V., 2004, "An Overview. Progress in Photovoltaics", **Thin-Film Solar Cells**, 12: p. 69-92.
- . 16 Imamzai, M., Aghaei, M., Hanum Md Thayoob, Y. , Forouzanfar, M.,2012, "A Review on Comparison between Traditional Silicon Solar Cells and Thin-Film CdTe Solar Cells", in *National Graduate Conference (Nat-Grad)*. Tenaga Nasional Universiti, Putrajaya Campus.
- . 17 [http://energyinformative.org/best-thin-film-solar-panels-amorphous-cadmium-telluride-cigs./](http://energyinformative.org/best-thin-film-solar-panels-amorphous-cadmium-telluride-cigs/)

- .۱۸ Yogi Goswami, D., Kreith, F., 2007, **Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy**. CRC Press, Boca Raton.
- .۱۹ Antonio Luque, S.H., 2003, **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- .۲۰ Badawy, W.A., 2015, "A Review on Solar Cells from Si-Single Crystals to Porous Materials and Quantum Dots", **Journal of Advanced Research**, 6: p. 123-132.
- .۲۱ Bagher, A.M., Vahid, M.M.A., Mohsen, M., 2015, "Types of Solar Cells and Application", **American Journal of Optics and Photonics**, 3: p. 94-113.
- .۲۲ Razykov, T.M., Ferekides, C.S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H.S., Upadhyaya, H.M., 2011, "Solar Photovoltaic Electricity: Current Status and Future Prospects", **Solar Energy**, 85: p. 1580-1608.
- .۲۳ " ,http://solarcellcentral.com/solar_page.html."
- .۲۴ Hoppe, H., Sariciftci, N.S., 2008, "Polymer Solar Cells", **Advances in Polymer Science**, 214: p. 1.
- .۲۵ Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P., Qiu, Y., 2006, "Review of Recent Progress in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 90: p. 549-573.
- .۲۶ Nozik, A.J., 2010, "Nanoscience and Nanostructures for Photovoltaics and Solar Fuels", **NANO Letters**, 10: p. 2735-2741.

- .٢٧ Suhaimi, S., Shahimin, M.M., Alahmed, Z.A., Chyský, J., Reshak, A.H., 2015, "Materials for Enhanced Dye-Sensitized Solar Cell Performance: Electrochemical Application", **International Journal of Electrochemical Science**, 10 :p. 28-59.
- .٢٨ Etula, J., 2012, "Comparison of three Finnish berries as sensitizers in a dye-sensitized solar cell. ", **European Journal for Young Scientists and Engineers**, 1(1): p. 5–23.
- .٢٩ S. Y. Huang , G.S., A. J. Nozik ,M. Grätzel ,A. J. Frank, 1997" ,Charge Recombination in Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO₂ Solar Cells", **Journal of Physical Chemistry**, 101 (14): p. 2576–2582.
- .٣٠ [https://www.wikipedia.org./](https://www.wikipedia.org/)
- .٣١ Barnes, P.R.F., Anderson, A.Y., Koops, S.E., Durrant, J.R., O'Regan, B.C., 2009, "Electron Injection Efficiency and Diffusion Length in Dyesensitized Solar Cells Derived from Incident Photon Conversion Efficiency Measurements", **The Journal of Physical Chemistry C**, 113: p. 1126-1136.
- .٣٢ Mohanta, P.R., Patel, J., Bhuvra, J., Gandhi, M., 2015, "A Review on Solar Photovoltaics and Roof Top Application of It", **International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology**, 2: p. 2394-2444.
- .٣٣ Ahn, N., Son, D.-Y., Jang, I.-H., Kang, S.M., Choi, M., Park, N.-G., 2015, "Highly Reproducible Perovskite Solar Cells with Average Efficiency of 18.3% and Best Efficiency of 19.7% Fabricated via Lewis Base Adduct of Lead(II) Iodide", **Journal of the American Chemical Society**, 137: p. 8696-8699.
- .٣٤ <http://www.pveducation.org./>

- .۳۵ Chang Kook Hong, H.-S.K., Eun-Mi Han, Je-Jung Yun, Kyung-Hee Park, 2013, "Enhanced efficiency of dye-sensitized solar cells doped with green phosphors LaPO₄:Ce, Tb or (Mg, Zn) Al₁₁O₁₉:Eu.", **Nanoscale Research Letters**: p. 8:219.
- .۳۶ Zhang, Y., et al., 2014, "Efficient ultraviolet and near-infrared conversion amorphous YbF₃:Er film", **Journal of Luminescence**, 145: p. 351-356.
- .۳۷ van der Ende, B.M., L. Aarts, and A. Meijerink, 2009, "Lanthanide ions as spectral converters for solar cells", **Physical Chemistry Chemical Physics**, 11(47): p. 11081-11095.
- .۳۸ Trupke, T., et al., 2006, "Efficiency enhancement of solar cells by luminescent up-conversion of sunlight", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 90(18–19): p. 3327-3338.
- .۳۹ Chen, Y., et al., 2012, " β -NaYF₄:Er³⁺ (micro)prisms for the enhancement of a-Si:H solar cell near-infrared responses", **Journal of Luminescence**, 132(9): p. 2247-2250.
- .۴۰ Xia, Z., et al., 2012, "Near-infrared luminescence and energy transfer studies of LaOBr:Nd³⁺/Yb³⁺", **Optics Express**, 20(S5) :p. A722-A728.
- .۴۱ Gai, S., et al., 2012, "Facile synthesis and up-conversion properties of monodisperse rare earth fluoride nanocrystals", **Dalton Transactions**, 41(38): p. 11716-11724.

- .۴۲ Shalav, A., B.S. Richards, and M.A. Green, 2007, "Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Up-conversion", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 91(9): p. 829-842.
- .۴۳ Richards, B.S., 2006, "Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Down-conversion", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 90(9): p. 1189-1207.
- .۴۴ van der Kolk, E., et al., 2008, "High-resolution luminescence spectroscopy study of down-conversion routes in NaGdF₄:Nd³⁺ and NaGdF₄:Tm³⁺ using synchrotron radiation", **Physical Review B**, 77(12): p. 125110.
- .۴۵ Heer ,S., et al., 2004, "Highly Efficient Multicolour Upconversion Emission in Transparent Colloids of Lanthanide-Doped NaYF₄ Nanocrystals", **Advanced Materials**, 16(23-24): p. 2102-2105.
- .۴۶ Li, C., et al., 2008, "Shape controllable synthesis and upconversion properties of NaYbF₄/NaYbF₄:Er³⁺ and YbF₃/YbF₃:Er³⁺ microstructures", **Journal of Materials Chemistry**, 18(12): p. 1353-1361.
- .۴۷ Bednarkiewicz, A., et al., 2012, "Giant enhancement of upconversion in ultra-small Er³⁺/Yb³⁺:NaYF₄ nanoparticles via laser annealing", **Nanotechnology**, 23(14): p. 145705.
- .۴۸ Ye, S., et al., 2008, "Enhanced cooperative quantum cutting in Tm³⁺-Yb³⁺ codoped glass ceramics containing LaF₃ nanocrystals", **Optics Express**, 16(12): p. 8989-8994.

- .۴۹ Deng, K., et al., 2011, "Efficient near-infrared quantum cutting in NaYF₄: Ho³⁺, Yb³⁺ for solar photovoltaics", **Optics Express**, 19(3): p. 1749-1754.
- .۵۰ Tao, L., et al., 2013, "Broadband conversion of ultraviolet to visible and near-infrared emission in Gd³⁺/Yb³⁺ codoped germanate glass", **Journal of Non-Crystalline Solids**, 376: p. 26-29.
- .۵۱ Iñiguez P, A., et al., 2008, "Luminescent and thermo-optical properties of germanate glasses", **Optical Materials**, 30(12): p. 1796-1799.
- .۵۲ Shockley, W. and H.J. Queisser, 1961, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", **Journal of Applied Physics**, 32(3): p. 510-519.
- .۵۳ Guan, Y., et al., 2014, "A highly efficient ultraviolet to near-infrared converter to improve efficiency of Si solar cells: Yb³⁺-doped BaGd₂(MoO₄)₄", **Materials Letters**, 117: p. 4-6.
- .۵۴ Guan, Y., et al., 2014, "Conversion and quantum efficiency from ultraviolet light to near infrared emission in Yb³⁺-doped pyrovanadates MZnV₂O₇ (M=Ca, Sr, Ba)", **Materials Science and Engineering: B**, 190: p. 26-32.
- .۵۵ Talewar ,R.A., C.P. Joshi, and S.V. Moharil, 2016, "Near infrared emission and energy transfer in Eu²⁺ - Nd³⁺ co-doped Ca₂BO₃Cl", **Optical Materials**, 55: p. 44-48.
- .۵۶ Pakhuruddin, M.Z., et al., 2013, "Fabrication and characterization of zinc oxide anti-reflective coating on flexible thin film microcrystalline silicon solar cell", **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, 124(22): p. 5397-5400.

- .٥٧ Müller, J., et al., 2003, "State-of-the-art mid-frequency sputtered ZnO films for thin film silicon solar cells and modules", **Thin Solid Films**, 442(1-2): p. 158-162.
- .٥٨ Limmanee, A., et al., 2011, "ZnO back reflector prepared by MOCVD technique for flexible solar cell applications", **Current Applied Physics**, 11(1, Supplement): p. S206-S209.
- .٥٩ Müller, J., et al., 2004, "TCO and light trapping in silicon thin film solar cells", **Solar Energy**, 77(6): p. 917-930.
- .٦٠ Dussan, A., R.H. Buitrago, and R.R. Koropecski, 2008, "Microcrystalline silicon thin films: A review of physical properties", **Microelectronics Journal**, 39(11): p. 1292-1295.
- .٦١ Yi-Qun Li, W.S., Shifan Cheng, Mike Ko, 2007, "WAVELENGTH-CONVERTING PHOSPHORS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF A PHOTOVOLTAIC DEVICE". Intematix Corporation, Fremont, CA (Us): United States.
- .٦٢ Li, D.H., et al., 2011, "Near-infrared down-conversion in Pr³⁺-Yb³⁺ co-doped transparent glass ceramic containing Ca₅(PO₄)₃F nanocrystals", **Physica B: Condensed Matter**, 446: p. 12-16.
- .٦٣ Saffar, A.P.B., B.D., 2014, "Thermal effects investigation on electrical properties of silicon solar cells treated by laser irradiation", **Int. Journal of Renewable Energy Development**, 3(3): p. 184-187.

- .۶۴ Egon Wiberg, N.W., Arnold Frederick Holleman, 2001, **Inorganic chemistry**. Academic Press.
- .۶۵ Parkes, G.D., Mellor, J. W., 1939, **Mellor's Modern Inorganic Chemistry**. Longman's Green and Co.
- .۶۶ wisniak, j., 2005, "phosphorus from discovery to commodity", **indian journal of chemical technology**, 12: p. 108-122.
- .۶۷ Salman, K.A., K. Omar, and Z. Hassan, 2011, "Improved performance of a crystalline silicon solar cell based on ZnO/PS anti-reflection coating layers", **Superlattices and Microstructures**, 50(5): p. 517-528.
- .۶۸ " ,<http://edu.nano.ir/paper/271>."
- .۶۹ Reichelt, K. and X. Jiang, 1990, "The preparation of thin films by physical vapour deposition methods", **Thin Solid Films**, 191(1): p. 91-126.
- .۷۰ " ,<http://www.mechscience.com/physical-vapor-deposition>."
- .۷۱ Gfroerer, T.H., 2000, **Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces**. Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Abstract

An important reason for low efficiency of silicon solar cells is the mismatch between the incident photons energy and band gap energy of solar cell, photons with energy lower than band gap energy are not absorbed and for photons with energy higher than band gap energy, their excess energy is transformed into kinetic energy of the produced electron-hole pair and is wasted subsequently. UV spectrum is the part of the sun radiation which has high energy. The energy of this part of sunlight spectrum is more than silicon band gap energy, so this part of light is not absorbed completely by silicon solar cell and some of the energy of the incident photon is wasted in terms of heat and phonons. In this research we intended to change UV spectrum into another range of light spectrum that could be absorbed better by silicon solar cell and its energy be near to silicon band gap energy.

Phosphorus is a material with photoluminescence property that absorbs UV spectrum of sunlight and emits visible and infrared light, that's why we used phosphorus layers, so that deposited phosphorus on silicon solar cells surface using physical vapor deposition (PVD) method. Deposition was repeated several times for different thickness of phosphorus layer and after every deposition efficiency of the cell was measured, by comparing the efficiency after deposition and the efficiency before it, we found some increase in the efficiency of the cell. Thicker layers of phosphorus led into more increase in solar cells efficiency, by increasing thickness of layers, increasing in solar cell efficiency stopped in 200 nm layer thickness and the variation of efficiency was descending for layers thicker than 200 nm. absorption spectra of the phosphorus layers was measured before and after deposition and it was found that phosphorus absorbs some of the radiations in UV spectrum. luminescence spectra was measured and it was found that phosphorus has emission in range of visible and infrared light.

X-Ray Diffraction (XRD) analysis was done for phosphorus layers and it was found that phosphorus layers have amorphous structure. SEM analysis was done for phosphorus layers and it was found that phosphorus layers are not conformal and phosphorus is aggregated in numerous points on the surface of silicon solar cell.

Key words: efficiency, silicon solar cells, phosphorus, photovoltaic effect



Shahrood University of Technology

Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in Nano Physics

**Improving of silicon Solar Cells Efficiency Using
Nanostructured Optical Layers**

By: Saeed Salehpour

Supervisor:

Dr. Hamid Haratizadeh

Advisor

Dr. Rahim Lotfi orimi

July 2017