

مدیریت نور در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با استفاده از لایه جابجاکننده طول موج فوتون

زهرا حسینی*

دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

جابجا کردن طیف نور فرودی بر سلول خورشیدی رنگدانه‌ای راهکاری مؤثر برای جبران جذب ضعیف رنگدانه در برخی طول موج‌ها محسوب می‌شود. این کار با استفاده از مواد نورتاب با طیف جذبی مکمل طیف جذب نور در سلول خورشیدی انجام می‌شود. همچنین، طیف تابش ماده نورتاب باید منطبق بر طول موج جذب سلول خورشیدی باشد. به دلیل امکان استفاده از طیف وسیعی از رنگدانه‌ها با طیف جذب متنوع در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای، این راهکار به‌ویژه برای افزایش بازده جذب نور در این نوع سلول خورشیدی مناسب به نظر می‌رسد. از سوی دیگر شفاف بودن سلول خورشیدی رنگدانه‌ای امکان اجرای این راهکار را در ساختارهای متفاوت ایجاد می‌کند. بدین منظور ماده نورتاب در خارج و یا داخل سلول خورشیدی و در ساختارهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله این راهکار و ملزومات اجرای آن شرح داده شده است. همچنین، ساختارهای ممکن مورد استفاده با این هدف به همراه گروه‌های مختلف مواد نورتاب معرفی شده است. نتایج ارایه شده در این مقاله نشان می‌دهد که انتخاب مناسب ساختار و ماده نورتاب مهمترین عوامل در افزایش قابل توجه بازده جذب نور و در نتیجه جریان و بازده سلول خورشیدی هستند.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی رنگدانه‌ای، مدیریت نور، جابجایی طول موج فوتون، نقاط کوانتومی، نورتابی.

ایمیل نویسنده مسئول: zahrahosseini@shirazu.ac.ir

۱-مقدمه

سلول خورشیدی رنگدانه‌ای یکی از جذاب‌ترین ابزارهای تبدیل نور خورشید به الکتریسیته محسوب می‌شود و از مزایای آن می‌توان به قیمت پایین، راحتی ساخت، امکان ساخت در رنگ‌های متفاوت و یا به صورت انعطاف‌پذیر اشاره کرد. از مهمترین مشکلات سلول خورشیدی رنگدانه‌ای، همانند دیگر انواع سلول خورشیدی، عدم توانایی جذب کل فوتون‌های رسیده از سمت خورشید است. توزیع طیفی فوتون‌های رسیده از سمت خورشید در طیف استاندارد AM1.5G، گستره پهنی از طول موج‌ها از ناحیه فرابنفش تا فروسرخ (۲۸۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) را در بر می‌گیرد، اما سلول‌های خورشیدی کنونی کسر نسبتاً کوچکی از این فوتون‌ها را جذب می‌کنند. بهترین سلول خورشیدی رنگدانه‌ای گزارش شده با بازده ۱۴٫۲٪ تنها فوتون‌های با طول موج کمتر از ۷۵۰ نانومتر را جذب می‌کند [۱]. این مسئله به بازه محدود جذب ماده جاذب نور در سلول خورشیدی مربوط می‌شود. از سوی دیگر با افزایش بازه جذب نور رنگدانه، ضریب جذب آن کاهش می‌یابد. همین امر دلیلی بر استفاده از لایه‌های متخلخل به نسبت ضخیم (بزرگتر از ۱۰ میکرومتر) در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای است تا بدین وسیله سطح مؤثر لایه و مقدار مولکول‌های رنگدانه جذب شده بر سطح لایه افزایش یافته و ضریب جذب پایین رنگدانه با افزایش غلظت آن جبران شود. اما این راهکار در مواردی چون

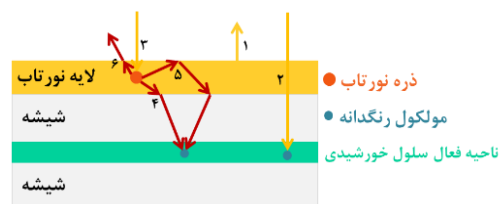
سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای انعطاف‌پذیر و یا سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای حالت جامد، به دلیل لزوم استفاده از لایه‌های بسیار نازک نیم‌رسانا، قابل اعمال نیست. در این موارد استفاده از رنگدانه‌های با ضریب جذب بالا ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از رنگدانه‌های با ضریب جذب بالا، با از دست دادن بخش قابل توجهی از فوتون‌های فرودی همراه خواهد بود، زیرا این رنگدانه‌ها بازه جذب باریکتری دارند. بنابراین استفاده از رنگدانه‌های با ضریب جذب بالا ضامن افزایش بازده جذب نور در سلول خورشیدی نخواهد بود. برای افزایش بازده جذب نور در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای راهکارهای متنوعی بکار گرفته شده است. استفاده از بیش از یک نوع رنگدانه برای حساس‌سازی سلول خورشیدی [۲]، استفاده از لایه پراکنده‌گر نور [۳]، ساخت سلول‌های خورشیدی پشت سرهم [۴]، انتقال انرژی رزونانسی فورستر [۵] و استفاده از کریستال فوتونی [۶] در سلول خورشیدی رنگدانه از جمله این راهکارهاست. راهکار دیگر جابجا کردن طیف نور با استفاده از مواد نورتاب است [۷، ۸]. در این راهکار ماده نورتاب بخشی از نور فرودی را جذب خواهد کرد که رنگدانه قابلیت جذب آن را ندارد. این بخش از نور سپس، با ماده نورتاب به فوتون‌هایی با طول موج قابل جذب توسط رنگدانه تبدیل شده و به این ترتیب رنگدانه توانایی جذب آنها را خواهد داشت. این جابجایی طول موج فوتون‌ها می‌تواند به سمت

انرژی‌های کمتر و یا انرژی‌های بیشتر اتفاق افتد. بسته به نوع و ساختار سلول خورشیدی، ماده نورتاب مناسب انتخاب شده و می‌تواند در ساختارهای متفاوتی در خارج و یا داخل سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بکار گرفته شود. اعمال لایه نورتاب به ویژه در مورد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی [۷، ۱۳-۹] و سلول‌های خورشیدی لایه نازک [۷، ۱۹-۱۴] مورد آزمایش قرار گرفته است.

۲- روش کار

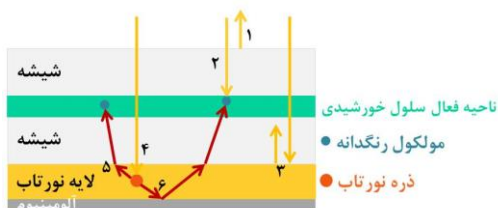
۲-۱- انتخاب ساختار مناسب

در مرسوم‌ترین ساختار مربوط به اعمال لایه جابجا کننده طیف نور بر سلول‌های خورشیدی، لایه شفافی از ماده نورتاب بر روی سلول خورشیدی طوری قرار می‌گیرد که نور پیش از رسیدن به سلول خورشیدی از این لایه نورتاب عبور می‌کند. این ساختار را ساختار عبوری لایه جابجا کننده طیف نور می‌نامیم که در شکل ۱ نشان داده شده است. بخشی از فوتون‌های فرودی در لایه جابجا کننده طیف نور جذب می‌شوند. بخش دیگر از این لایه عبور کرده و وارد سلول خورشیدی رنگدانه‌ای می‌شود. لایه نورتاب فوتون‌های جذب شده در این لایه را به صورت فوتون‌هایی با انرژی کمتر تابش می‌کند. بخشی از فوتون‌های تابش شده یا بطور مستقیم و یا پس از بازتاب از مرز لایه نورتاب/هوا وارد سلول خورشیدی می‌شوند. این در حالی است که کسری از فوتون‌های تابش شده از لایه نورتاب به دلیل فرار از مرز لایه نورتاب/هوا شانس رسیدن به سلول خورشیدی رنگدانه‌ای را نخواهند داشت. این ساختار به‌ویژه در اعمال این راهکار بر سلول‌هایی که امکان ساخت آنها به صورت شفاف وجود ندارد کاربرد دارد. همچنین در مورد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و لایه نازک، از آنجا که برخی اجزای سلول خورشیدی، از جمله لایه پنجره‌ای، نور فرابنفش را که باید در لایه نورتاب جذب شود را جذب می‌کنند، این ساختار تنها ساختار قابل استفاده خواهد بود.

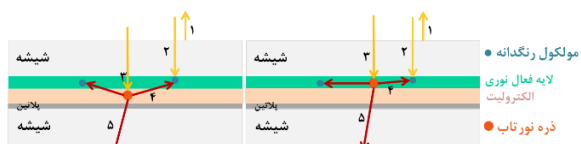


شکل ۱. مسیرهای اپتیکی درگیر در ساختار عبوری لایه جابجا کننده طیف نور. کسری از فوتون‌های فرودی در مرز هوا/لایه نورتاب بازتاب می‌شوند (۱). کسر دیگر از لایه نورتاب عبور کرده، وارد سلول خورشیدی رنگدانه‌ای می‌شوند (۲). بخشی از فوتون‌های فرودی نیز در لایه جابجا کننده طیف نور جذب می‌شوند (۳). لایه نورتاب فوتون‌های جذب شده در این لایه را به صورت فوتون‌هایی با انرژی کمتر تابش می‌کند. بخشی از فوتون‌های تابش شده یا بطور مستقیم (۴) و یا پس از بازتاب از مرز لایه نورتاب/هوا (۵) وارد سلول خورشیدی می‌شوند. این در حالی است که کسری از فوتون‌های تابش شده از لایه نورتاب به دلیل فرار از مرز لایه نورتاب/هوا شانس رسیدن به سلول خورشیدی رنگدانه‌ای را نخواهند داشت (۶).

از آنجا که سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای را می‌توان به صورت شفاف ساخت، لایه جابجا کننده طیف نور را می‌توان در پشت سلول خورشیدی به نحوی قرار داد که نور پیش از رسیدن به این لایه از سلول خورشیدی عبور کند. این ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است. در این ساختار کسری از فوتون‌های فرودی در مرز هوا/سلول خورشیدی بازتاب می‌شوند. کسر دیگر وارد سلول خورشیدی شده، فوتون‌های قرمز و فروسرخ نزدیک که در ناحیه جذب رنگدانه SQ1 قرار می‌گیرند در گذر اولیه از سلول خورشیدی و یا پس از بازتاب از لایه نورتاب توسط مولکول‌های رنگدانه جذب می‌شوند. کسری از فوتون‌های عبوری از سلول خورشیدی توسط این لایه جذب شده و به صورت فوتون‌هایی با انرژی کمتر بازتابش می‌شوند. فوتون‌های تابش شده در بازگشت مستقیم به سلول خورشیدی رنگدانه‌ای و یا پس از بازتاب از مرز لایه نورتاب/لایه آلومینیم توسط مولکول‌های رنگدانه داخل سلول خورشیدی جذب می‌شوند. از مزایای این ساختار ورود مستقیم نور به سلول خورشیدی رنگدانه‌ای پیش از رسیدن به لایه نورتاب است.



شکل ۲. مسیرهای نوری درگیر در ساختار سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به همراه لایه بازتابی جابجاکننده نور. کسری از فوتون‌های فرودی در مرز هوا/سلول خورشیدی بازتاب می‌شوند (۱). کسر دیگر وارد سلول خورشیدی شده، فوتون‌هایی که در ناحیه جذب رنگدانه قرار دارند در گذر اولیه از سلول خورشیدی (۲) و یا پس از بازتاب از لایه نورتاب (۳) با مولکول‌های رنگدانه جذب می‌شوند. کسری از فوتون‌های عبوری از سلول خورشیدی توسط این لایه جذب شده (۴) و به صورت فوتون‌هایی با انرژی کمتر بازتابش می‌شوند. فوتون‌های تابش شده در بازگشت مستقیم به سلول خورشیدی رنگدانه‌ای (۵) و یا پس از بازتاب از مرز لایه نورتاب/لایه آلومینیم (۶) با مولکول‌های رنگدانه داخل سلول خورشیدی جذب می‌شوند.



شکل ۳. ساختار سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به همراه ماده نورتاب درون لایه متخلخل تیتانیوم دی اکسید (سمت راست) و یا ماده نورتاب پخش شده در الکتروولت (سمت چپ). کسری از فوتون‌های فرودی در مرز هوا/سلول خورشیدی بازتاب می‌شوند (۱). کسر دیگر وارد سلول خورشیدی شده، فوتون‌هایی که در ناحیه جذب رنگدانه قرار دارند توسط مولکول‌های رنگدانه جذب می‌شوند (۲). دیگر فوتون‌ها توسط ماده نورتاب جذب شده (۳)، نور تابشی که طول موجی در بازه جذب رنگدانه دارد یا توسط مولکول‌های رنگدانه جذب می‌شود (۴) و یا از سمت کاند از سلول خورشیدی خارج می‌شود (۵).

دارند و به تقریب گران هستند [۷، ۲۱]. فسفرهای معدنی بازده نورتابی بالایی دارند اما ضریب جذب آنها پایین است. اغلب طیف جذب پهنی دارند و همپوشانی میان طیف جذب و تابش آنها یا بسیار کم است و یا اصلاً همپوشانی وجود ندارد. اینگونه فسفرهای معدنی، پایداری نوری بالایی از خود نشان می‌دهند [۷، ۲۲، ۲۳]. به نظر می‌رسد فسفرهای معدنی ویژگی بسیار مناسبی برای کاربرد در ساختار مورد نظر در این راهکار از خود نشان

می‌دهند و ضریب جذب پایین آنها را می‌توان با افزایش غلظت مورد استفاده جبران کرد.

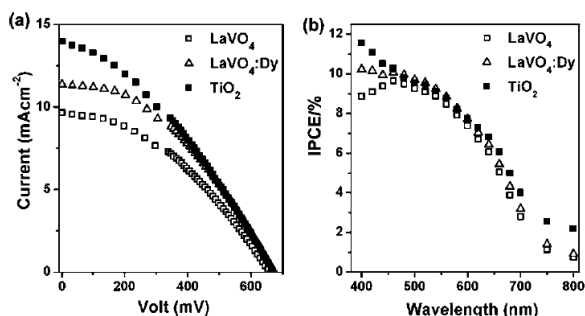
۳- جابجایی طیف نور فرودی بر سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

برای اعمال راهکار معرفی شده در بخش قبل بر سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و یا لایه نازک، تنها ساختار مورد استفاده، ساختاری است که در آن ماده نورتاب به صورت لایه‌ای شفاف بر روی سلول خورشیدی قرار می‌گیرد، به نحوی که نور پیش از رسیدن به سلول خورشیدی از لایه نورتاب عبور می‌کند [۷، ۲۴]. طبیعی است ماده نورتاب با توجه به ملزومات اشاره شده در بخش ۳، بسته به طیف جذب ماده جاذب نور در سلول خورشیدی انتخاب می‌شود. جابجایی طیف نور با ماده نورتاب می‌تواند با جابجایی به سمت فوتون‌های پرانرژی‌تر [۸، ۲۵-۲۷] و یا جابجایی به سمت فوتون‌های کم انرژی‌تر [۷، ۸، ۳۳-۲۸] انجام شود. انتخاب سازوکار جابجایی نیز به ناحیه طول موجی که سلول خورشیدی در جذب آن ضعف دارد وابسته است. گزارشات بسیار زیادی با نتایج متنوعی اعم از نتایج مثبت، خنثی و یا منفی، مبنی بر استفاده از این راهکار بر سلول خورشیدی سیلیکونی و یا لایه نازک وجود دارد اما تعداد گزارشات مبنی بر اعمال این راهکار بر سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بسیار محدود است. اما همین گزارشها محدود ساختارهای متنوعی را ارائه کرده‌اند. دلیل تنوع ساختارهای مورد استفاده برای اعمال این راهکار به امکان استفاده از ماده نورتاب در داخل سلول خورشیدی رنگدانه‌ای و همچنین امکان ساخت سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به صورت شفاف مربوط می‌شود.

در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای ماده نورتاب می‌تواند در داخل سلول خورشیدی نیز بکار گرفته شود. برای این کار ذرات ماده نورتاب می‌توانند در کنار ذرات نیمه‌هادی با غلظت مناسب در لایه متخلخل قرار گیرند و یا این ذرات در الکترولیت پخش شوند. این دو ساختار در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. کسری از فوتون‌های فرودی در مرز هوا/سلول خورشیدی بازتاب می‌شوند. کسر دیگر وارد سلول خورشیدی شده، فوتون‌هایی که در ناحیه جذب رنگدانه قرار دارند، با مولکول‌های رنگدانه جذب می‌شوند. دیگر فوتون‌ها با ماده نورتاب جذب شده، نور تابشی که طول موجی در بازه جذب رنگدانه دارد یا با مولکول‌های رنگدانه جذب می‌شود و یا از سمت کاتد از سلول خورشیدی خارج می‌شود. بسته به اندازه ذرات نورتاب بکار گرفته شده این ذرات می‌توانند به عنوان ذرات پراکنده‌گر نور نیز عمل کنند. البته غلظت بالای این ذرات در لایه متخلخل نیمه‌هادی می‌تواند با ایجاد اختلال در مسیر عبور الکترون، بازده جمع‌آوری الکترون در این لایه را کاهش دهد. از سوی دیگر حضور ذرات نورتاب در الکترولیت، ممکن است با مشکلاتی از قبیل اختلال در نفوذ یون‌ها و جذب نور تحریکی و یا تابشی ذرات نورتاب توسط الکترولیت به همراه باشد. ممانعت از حضور چنین مشکلاتی مستلزم استفاده از ذرات نورتاب با طیف تحریک و تابش مناسب، و غلظت بهینه این ذرات در الکترولیت است، به نحوی که بازه جذب الکترولیت با هیچ‌یک از طول‌موج‌های تحریک و یا تابش ذرات نورتاب همپوشانی نداشته باشد.

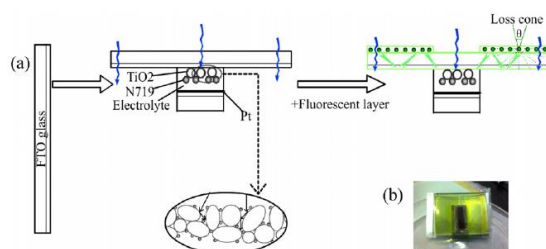
۲-۲- ماده نورتاب

ویژگی‌های گونه نورتاب مورد استفاده در این راهکار به طور ایده‌آل عبارتند از [۷]: بازده نورتابی ۱۰۰٪، طیف جذب پهن در ناحیه‌ای از طول‌موج‌ها که IPCE سلول خورشیدی کم است، ضریب جذب بالا، تابش در ناحیه‌ای از طول‌موج‌ها که IPCE سلول خورشیدی ماکزیمم است، جدایش کافی میان طیف جذب و تابش ماده نورتاب برای جلوگیری از جذب دوباره نور تابشی توسط ماده نورتاب، قیمت پایین و پایداری کافی. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، انتخاب ماده نورتاب می‌تواند از میان سه گروه رنگدانه‌های آلی، نقاط کوانتومی و یا فسفرهای معدنی انجام شود. رنگدانه‌های آلی ضرایب جذب به نسبت بالایی دارند، بازده نورتابی آنها نزدیک به یک است و به راحتی در بستر بسپاری پخش می‌شوند. اما از عیوب آنها می‌توان به گستره باریک جذب و عدم جدایش کافی میان بازه جذب و تابش آنها اشاره کرد که منجر به جذب دوباره نور تابش شده می‌شود. همچنین، در برخی موارد پایداری کافی در مقابل نور UV برای مدت طولانی وجود ندارد [۷، ۲۰]. نقاط کوانتومی در واقع کریستال‌های نانومتری نیمه‌هادی هستند که گستره جذب و تابش آنها با توجه به سایز آنها قابل تنظیم است. آنها اغلب گستره پهنی از طول‌موج‌ها را جذب می‌کنند، شدت تابش بالا و پایداری به نسبت خوبی از خود نشان می‌دهند. از سوی دیگر، به دلیل همپوشانی زیاد میان طیف جذب و تابش آنها، اتلاف زیادی ایجاد می‌کنند. همچنین، بازده نورتابی به نسبت ضعیفی



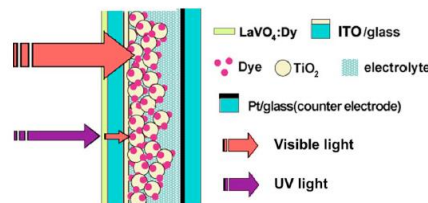
شکل ۶. منحنی جریان-ولتاژ (سمت چپ) و IPCE (سمت راست) سلول خورشیدی رنگدانه‌ای بدون لایه نورتاب و با لایه نورتاب (با و بدون ناخالصی Dy) [۳۴]

در سال ۲۰۱۰، لی و همکارانش، اعمال لایه نورتاب را بر یک سلول خورشیدی رنگدانه‌ای حساس شده با رنگدانه N719 آزمایش کردند. ساختار مطرح شده توسط آنها در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، و با توجه به طیف جذب و تابش ماده نورتاب، و طیف جذب رنگدانه N719 که در شکل ۸ نشان داده شده است، واضح است با تابش نور به سلول خورشیدی، بخشی از نور مستقیم وارد سلول شده و با رنگدانه جذب می‌شود. بخش دیگر نور توسط ماده نورتاب جذب و در طول موج‌هایی که در ناحیه جذب رنگدانه قرار می‌گیرد تابش می‌شود. نور تابش شده با بازتاب داخلی در شیشه، به سلول منتقل شده و پس از ورود به سلول با رنگدانه جذب می‌شود. قابل ذکر است در این پژوهش، ماده نورتاب از گروه رنگدانه‌های آلی (FY 10 GN) انتخاب شده است. بدین ترتیب با استفاده از این لایه، بازده جذب نور به مقدار ۴۴٪ در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای افزایش یافته است [۳۵]. باید توجه داشت که در این ساختار نور از مساحت بزرگتری نسبت به مساحت سلول خورشیدی جمع‌آوری می‌شود و این موضوع به مقدار افزایش نور فرودی بر سلول خورشیدی بسیار کمک می‌کند.

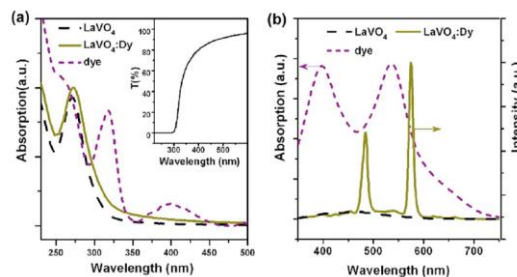


شکل ۷. (a) طرحواره مراحل ساخت سلول خورشیدی رنگدانه همراه با لایه LDS. (b) عکس سلول خورشیدی رنگدانه‌ای نهایی [۳۵]

لیو و همکارانش [۳۴]، لایه‌ای حاوی ذرات نورتاب $\text{LaVO}_4:\text{Dy}^{3+}$ را بر سلول خورشیدی رنگدانه‌ای حساس شده با رنگدانه N3 قرار دادند (شکل ۴). این لایه نور UV را جذب و نور مرئی تابش می‌کند. طیف جذب و تابش این لایه در مقایسه با طیف جذب رنگدانه N3 در شکل ۵ نشان داده شده است.



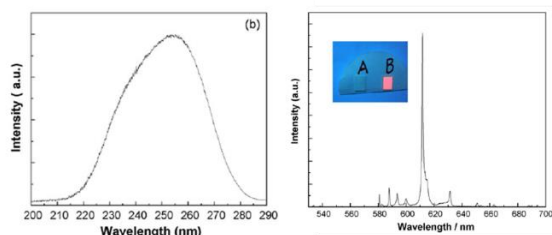
شکل ۴. ساختار سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با لایه نورتاب تبدیل کننده نور UV به نور مرئی [۳۴]



شکل ۵. سمت چپ: طیف جذب لایه نورتاب (با و بدون ناخالصی Dy) در مقایسه با طیف جذب رنگدانه N3. سمت راست: طیف نورتابی لایه نورتاب در مقایسه با طیف جذب رنگدانه N3 [۳۴]

لیو و همکارانش، انتظار داشتند اعمال این لایه و تبدیل نور UV به نور مرئی، منجر به افزایش تعداد فوتون‌های جذب شده توسط رنگدانه و در نتیجه افزایش جریان اتصال کوتاه سلول و بازده کل سلول خورشیدی شود. اما مقایسه عملکرد سلول‌های خورشیدی بدون این لایه و با حضور این لایه (شکل ۶) این انتظار را برآورده نکرده و سلول خورشیدی با حضور این لایه نورتاب عملکرد ضعیفتری نیز نشان داده است [۳۴]. دلیل این امر را می‌توان به عدم انتخاب متناسب ماده نورتاب و رنگدانه نسبت داد. همانگونه که از طیف جذب و تابش نشان داده شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود، لایه نورتاب بخشی از فوتون‌های فرودی را جذب می‌کند که رنگدانه داخل سلول خورشیدی خود توانایی جذب آن را داشته است. البته حضور این لایه به دلیل جلوگیری از ورود نور UV به داخل سلول خورشیدی باعث افزایش طول عمر سلول شده است [۳۴].

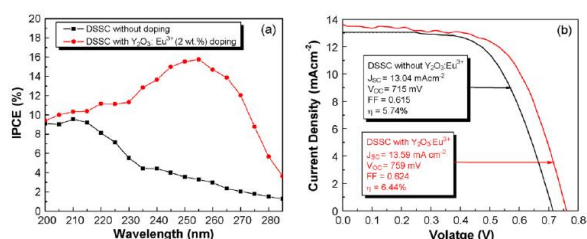
UV افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. نکته قابل تأمل در این گزارش این است که چگونه IPCE سلول خورشیدی در طول موج‌های کوچکتر از ۳۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شده است. درحالی‌که زیرلایه شیشه‌ای فوتون‌های این ناحیه طول موجی را جذب کرده و اجازه ورود این فوتون‌ها به داخل سلول خورشیدی را نمی‌دهد.



شکل ۹. طیف تحریک (سمت چپ) و طیف تابش (سمت راست) ماده نورتاب $Y_2O_3:Eu^{3+}$ [۳۶]

جدول ۱. پارامترهای جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی ساخته شده با درصد‌های متفاوت ماده نورتاب در لایه تیتانیم دی اکسید [۳۶]

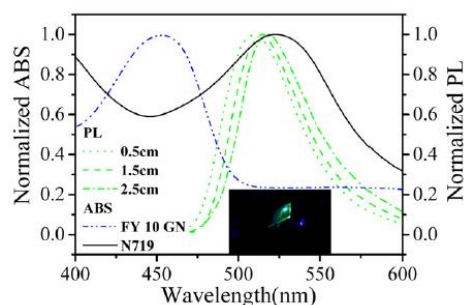
$Y_2O_3:Eu^{3+}$ (%)	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
0 wt. %	13.04	0.715	0.615	5.74
1 wt. %	13.31	0.734	0.621	6.07
2 wt. %	13.59	0.759	0.624	6.44
3 wt. %	13.26	0.788	0.623	6.52
4 wt. %	12.35	0.799	0.611	6.03
5 wt. %	10.41	0.817	0.643	5.47



شکل ۱۰. منحنی جریان-ولتاژ (سمت راست) و طیف IPCE (سمت چپ) سلول‌های خورشیدی با و بدون حضور ماده نورتاب در لایه تیتانیم دی اکسید [۳۶]

در گزارشی دیگر، دموپولوس و همکارانش ساخت و استفاده از نانوکامپوزیت‌های LaF_3-TiO_2 که همزمان با دو نوع ناخالصی Yb^{3+}/Er^{3+} آلاینده شده را گزارش کردند [۲۶]. در این پژوهش، سلول خورشیدی با استفاده از الکترودی با ساختاری چندلایه‌ای که در شکل ۱۱ نشان داده شده است و با استفاده از رنگدانه N719 ساخته شد. ۴ نوع متفاوت ساختار چند لایه‌ای الکترودی سلول خورشیدی با ترتیب لایه نشانی متفاوت از لایه شفاف TiO_2 ، لایه جابجا کننده طیف نور، و لایه پراکنده‌گر نور مورد بررسی قرار گرفته است.

هرچند بررسی نورتابی لایه جابجاکننده طیف نور پیش و پس از حساس سازی با رنگدانه نشان دهنده جذب نور تابشی لایه نورتاب با مولکول‌های رنگدانه‌است، بررسی عملکرد سلول‌های خورشیدی با لایه جابجاکننده طیف نور بازدهی بهتری نسبت به سلول خورشیدی بدون این لایه نشان نمی‌دهد. حضور لایه نورتاب جریان سلول خورشیدی را حدود ۲/۴٪ افزایش می‌دهد



شکل ۸. طیف جذب رنگدانه N719 به همراه طیف جذب و تابش رنگدانه FY 10 GN [۳۵] طیف تابش در فواصل متفاوت از محل فرود نور لیزر اندازه‌گیری شده است.

همچنین، در سال ۲۰۱۰ وو و همکارانش، استفاده از ماده نورتاب $Y_2O_3:Eu^{3+}$ را در لایه دی اکسید تیتانیم در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای گزارش کردند [۳۶]. آنها ابتدا ماده نورتاب را تهیه و سپس در غلظت‌های متفاوت در خمیر دی اکسید تیتانیم وارد کرده و لایه ای ۴ میکرومتری بر لایه شفاف تیتانیم دی اکسید با استفاده از خمیر جدید (مخلوط TiO_2 و $Y_2O_3:Eu^{3+}$) به روش دکتر بلید لایه نشانی کردند. این ماده نورتاب فوتون‌های با طول موج ۲۲۰ تا ۲۸۰ نانومتر را جذب و در طول موج حدود ۶۱۰ نانومتر تابش می‌کند (شکل ۹). رنگدانه مورد استفاده در سلول خورشیدی رنگدانه N719 بوده است [۳۶].

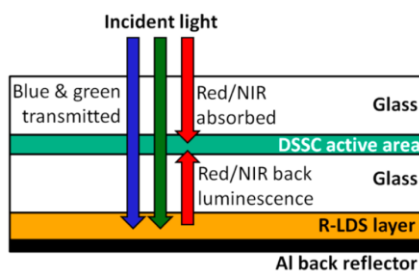
پس از ساخت سلول خورشیدی، عملکرد سلول‌های خورشیدی ساخته شده با درصد‌های متفاوت ماده نورتاب در خمیر تیتانیم دی اکسید مورد بررسی قرار گرفته است [۳۶]. نتایج این شناسایی در جدول ۱ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار ماده نورتاب چگالی جریان ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. این درحالی است که ولتاژ مدار باز سلول خورشیدی با افزایش مقدار ماده نورتاب تا ۸۱۵ میلی ولت برای ۵ درصد وزنی ماده نورتاب افزایش یافته است. در این گزارش افزایش جریان به جابجایی طیف نور با ماده نورتاب و افزایش ولتاژ مدار باز به ایجاد ناخالصی نوع p در لایه تیتانیم دی اکسید توسط ماده نورتاب نسبت داده شده است که باعث جابجایی ترازهای انرژی به سمت بالا در لایه تیتانیم دی اکسید می‌شود. اما افزایش مقدار ماده نورتاب بیشتر از مقدار ۲ درصد وزنی منجر به ایجاد نقص‌هایی در لایه تیتانیم دی اکسید شده که از آن طریق بازترکیب حامل‌های بار در این لایه صورت گرفته و جریان سلول خورشیدی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار افزایش بازده سلول خورشیدی با حضور ۳ درصد وزنی ماده نورتاب در سلول خورشیدی بدست آمده است که بازده سلول خورشیدی را با ۱/۱۴٪ افزایش نسبت به بازده سلول خورشیدی بدون ماده نورتاب به ۶/۵۲٪ رسانده است [۳۶].

شکل ۱۰، منحنی جریان-ولتاژ و طیف IPCE سلول خورشیدی ساخته شده با ۲ درصد وزنی ماده نورتاب را نشان می‌دهد [۳۶]. طیف IPCE سلول خورشیدی با ماده نورتاب در ناحیه

است [۲۷]. به عبارت دیگر، این لایه با برگشت نور عبوری به سمت سلول خورشیدی جریان آن را افزایش داده است و نه با جابجاکردن طیف نور. این موضوع نشان دهنده بازده نورتابی بسیار کم ماده نورتاب استفاده شده در این ساختار است که مانع از ظهور اثر آن به عنوان لایه جابجا کننده طیف نور می‌شود. البته مقایسه دقیق طیف تابش این لایه و طیف جذب رنگدانه N719 نیز نشان می‌دهد که برهم‌کنش مناسب و کافی میان این دو طیف وجود ندارد. همین امر دلیل دیگری بر عملکرد بد این لایه در این ساختار باشد.

در سال ۲۰۱۱ همچنین حافظ و همکارانش ساخت فوتوالکترود TiO_2 ناخالص شده با لانتانیدها را گزارش کردند [۳۷]. بازدهی ۵/۸۱٪ و ۵/۱۶٪ برای سلول‌های ساخته شده با فوتوالکترودهای ناخالص شده با یون‌های Eu^{3+} و Sm^{3+} گزارش شد در حالیکه سلول ساخته شده با فوتوالکترود بدون ناخالصی بازدهی ۴/۲۳٪ نشان داده بود. در ساخت این سلول‌های خورشیدی از رنگدانه N719 استفاده شده بود [۳۷].

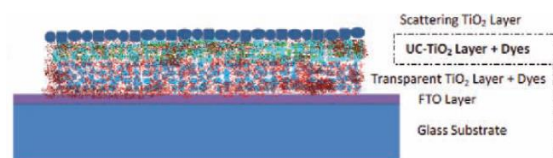
بهترین گزارش مبنی بر استفاده از راهکار جابجایی طیف نور در سلول خورشیدی مربوط به استفاده از لایه حاوی فسفرهای معدنی در خارج سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه SQ1 است [۳۸]. حضور لایه نورتاب در پشت سلول خورشیدی نه تنها موجب جابجا کردن طیف نور می‌شود، بلکه با پراکنده کردن نور، نور عبوری از سلول خورشیدی را بار دیگر به سمت سلول خورشیدی باز می‌گرداند. طرحواره ساختار بکار گرفته شده در این پژوهش در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴. طرحواره سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه جاذب نور قرمز به همراه لایه نورتابی جابجا کننده طیف نور

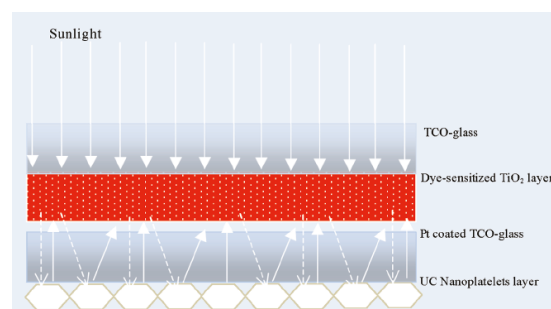
به این ترتیب حضور لایه نورتاب باعث افزایش قابل توجه بازده جذب نور در طول موج‌های ۴۰۰ تا ۵۵۰ نانومتر و در نتیجه افزایش چگالی جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی تا حدود ۴۰ تا ۵۴٪ شده است. طیف IPCE این سلول‌های خورشیدی به خوبی اثر لایه نورتاب را به عنوان لایه جابجاکننده طیف نور نشان می‌دهد (شکل ۱۵). این مقدار افزایش جریان در سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه SQ1 منجر به دستیابی به بازده ۵٪ برای این سلول خورشیدی شده است که بالاترین بازده گزارش شده برای سلول خورشیدی رنگدانه‌ای حساس شده با رنگدانه SQ1 است. قابل ذکر است بهترین نتایج بدست آمده در این پژوهش با استفاده از فسفر $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ (LDS1) با بازده کوانتومی ۵۱٪ بدست آمده است. طبیعی است در

اما به دلیل ایجاد مقاومت در سلول خورشیدی به دلیل حضور این لایه و تأثیر منفی بر ضریب پخشندگی سلول خورشیدی، بازده سلول خورشیدی بهبود نمی‌یابد [۲۶].

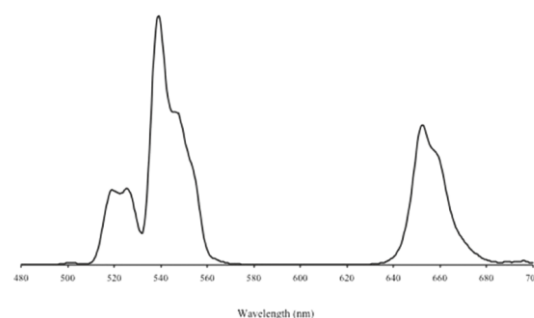


شکل ۱۱. طرحواره ساختار چندلایه‌ای الکترود مورد استفاده در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای [۲۶]

همین گروه در گزارشی دیگر در سال ۲۰۱۱، ماده نورتاب $\beta\text{-NaYF}_4:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ را در لایه‌ای در خارج سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه N719 استفاده کردند [۲۷]. آنها این لایه را در سمت کاتد قرار داده و در بررسی عملکرد سلول خورشیدی نورتابی را از سمت آنند اعمال کردند. طرحواره این سلول خورشیدی در شکل ۱۲ و طیف تابش لایه جابجا کننده طیف نور در شکل ۱۳ نشان داده شده است [۲۷].



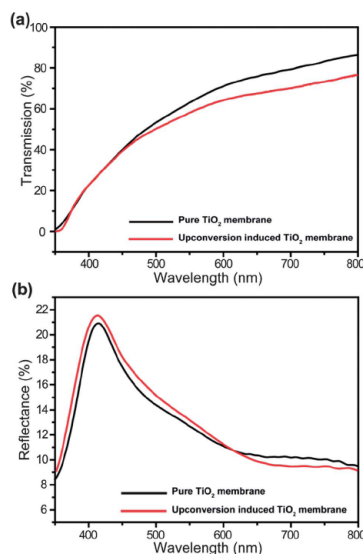
شکل ۱۲. طرحواره سلول خورشیدی تشکیل شده از یک لایه شفاف تیتانیوم دی اکسید در داخل و لایه حاوی ماده نورتاب $\beta\text{-NaYF}_4:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ در خارج [۲۷]



شکل ۱۳. طیف تابش لایه حاوی ماده نورتاب $\beta\text{-NaYF}_4:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ تحت طول موج تحریک ۹۸۰ نانومتر [۲۷]

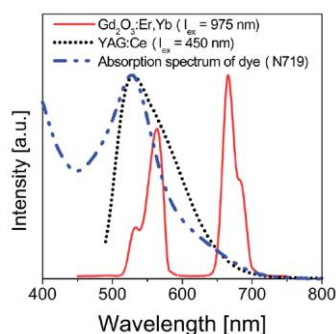
با این ساختار دموپولوس و همکارانش، توانستند حدود ۱۱٪ جریان سلول خورشیدی را نسبت به حالتی که لایه نورتاب در پشت سلول قرار ندارد را افزایش دهند اما بررسی دقیق‌تر ساختار نشان داده است که از این مقدار افزایش جریان تنها ۱٪ آن سهم اثر جابجا کنندگی طیف نور توسط این لایه بوده

سیلیکا و با استفاده از ذرات نانومتری، اثر پراکندگی نور توسط این ذرات در لایه فوتوآند را حذف کرده و به این ترتیب اعلام کردند این مقدار افزایش جریان سلول خورشیدی تنها ناشی از تبدیل فوتون‌های کم انرژی به فوتون‌های پرنرژی توسط ماده نورتاب است [۲۴]. طیف عبور و بازتاب فوتوآندهای بدون نانوذرات نورتاب و با نانوذرات نورتاب در شکل ۱۷ نشان داده شده است و نشان می‌دهد که با حضور نانوذرات نورتاب بازتاب لایه تغییری نکرده است. بنابراین، این ذرات اثر پراکندگی نور ایجاد نمی‌کنند.



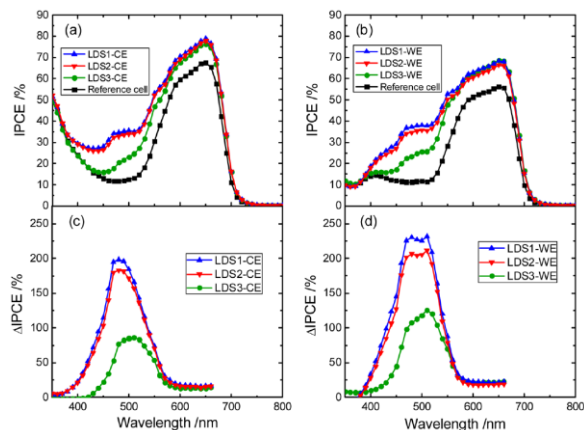
شکل ۱۷. طیف عبور (نمودار بالا) و بازتاب (نمودار پایین) فوتوآندهای بدون نانوذرات نورتاب و با نانوذرات نورتاب [۲۵]

لیم و همکارانش در سال ۲۰۱۴ استفاده از دو ماده نورتاب را در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با هدف افزایش بازده جذب نور گزارش کردند [۴۰]. طیف تابش این دو ماده نورتاب که یکی جابجا کننده طیف نور به سمت فوتون‌های پرنرژی‌تر و دیگر جابجا کننده نور به سمت فوتون‌های کم‌انرژی‌تر است، در کنار طیف جذب رنگدانه مورد استفاده (N719) در شکل ۱۸ نشان داده شده است و برهم‌کنش مناسب طیف تابش این مواد را با طیف جذب رنگدانه نشان می‌دهد.



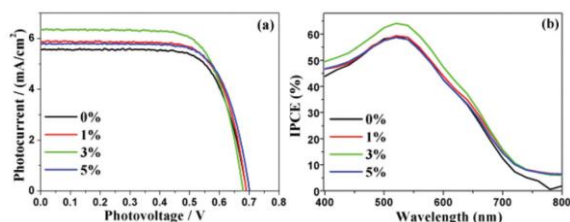
شکل ۱۸. طیف تابش مواد نورتاب استفاده به عنوان جابجا کننده طیف نور در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به همراه طیف جذب رنگدانه N719 [۴۰]

صورت استفاده از فسفرهای با بازده کوانتومی بالاتر نتایج بهتری بدست خواهد آمد.



شکل ۱۵. IPCE و درصد تغییرات IPCE سلول‌های خورشیدی با و بدون لایه بازتابی جابجاکننده طیف نور برای دو حالت نورتابی از سمت آند (c,a) و نورتابی از سمت کاتد (d,b) [۲۸]

در گزارشی مشابه با گزارش دموپولوس و همکارانش (۲۰۱۰)، در سال ۲۰۱۳ لی و همکارانش ساخت سلول خورشیدی حساس شده با رنگدانه N719 را با وارد کردن میکروکریستال‌های $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ در لایه تیتانیم دی اکسید گزارش کردند [۳۹]. سلول‌های ساخته شده حاوی این ماده نورتاب در فوتوآند، ۱۰٪ بازدهی بهتری نسبت به سلول‌های بدون این ماده نشان دادند. هرچند در این گزارش IPCE سلول‌های خورشیدی ساخته شده با حضور غلظت‌های متفاوت از ماده نورتاب در فوتوآند گزارش شده است (شکل ۱۶)، هیچ شاهدهی مبنی بر افزایش IPCE به دلیل اثر جابجاکنندگی نور ارائه نشده است. این در حالی است که به دلیل سایز میکرونی ذرات وارد شده در فوتوآند، این ذرات می‌توانند نقش پراکنده‌گرهای نور را ایفا کرده و به این ترتیب بازده جذب نور را افزایش دهند.



شکل ۱۶. منحنی جریان ولتاژ (سمت چپ) و IPCE (سمت راست) سلول‌های خورشیدی با فوتوآند حاوی غلظت‌های متفاوت $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ [۳۹]

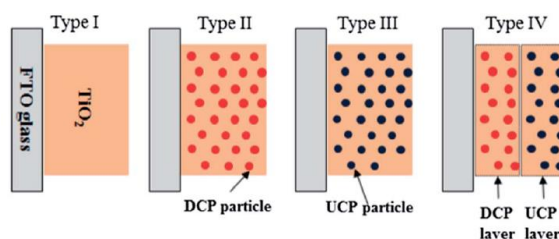
چندماه بعد در گزارشی ژو و همکارانش اعلام کردند که با استفاده از ماده نورتاب مشابه $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ در فوتوآند سلول خورشیدی رنگدانه‌ای و با قراردادن پوششی از SiO_2 بر روی ذرات نورتاب توانسته‌اند چگالی جریان سلول خورشیدی را تا ۵/۵ درصد افزایش دهند [۲۵]. آنها با استفاده از پوشش

شفاف بودن سلول خورشیدی رنگدانه‌ای امکان اجرای این راهکار را در ساختارهای متفاوت ایجاد می‌کند در حالی‌که در مورد دیگر انواع سلول خورشیدی، اجرای این راهکار مستلزم ساخت لایه‌ای شفاف از ماده نورتاپ و قرارگیری آن بر روی سلول خورشیدی است. مروری بر گزارش‌های مبتنی بر جابجایی طیف نور در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای نشان داد که انتخاب مناسب ساختار و ماده نورتاپ مهمترین عوامل در افزایش قابل توجه بازده جذب نور و در نتیجه جریان و بازده سلول خورشیدی هستند.

۵- منابع

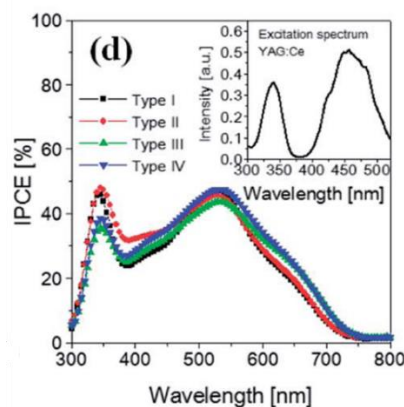
- [۱] J. Ji, H. Zhou, Y.K. Eom, C.H. Kim, H.K. Kim, *Adv. Energy Mater.*, 10, 2000124 (2020).
- [2] H.-P. Wu, Z.-W. Ou, T.-Y. Pan, C.-M. Lan, W.-K. Huang, H.-W. Lee, N.M. Reddy, C.-T. Chen, W.-S. Chao, C.-Y. Yeh, E.W.-G. Diau, *Energy Environ. Sci.*, 5, 9843–9848 (2012).
- [3] N. Ghazyani, M. H. Majles Ara, F. Tajabadi, A. Dabirian, R. Mohammadpour, N. Taghavinia, *RSC Advance*, 4, 3621–3626, 2014.
- [4] M. Dürr, A. Bamedi, A. Yasuda, G. Nelles, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 3397, (2004).
- [5] J.I. Basham, G.K. Mor, C.A. Grimes, *ACS Nano.*, 4, 1253–1258, (2010).
- [6] S. Colodrero, A. Mihi, L. Häggman, M. Ocaña, G. Boschloo, A. Hagfeldt, H. Míguez, *Adv. Mater.*, 21, 764–770, (2009).
- [7] E. Klampaftis, D. Ross, K.R. McIntosh, B.S. Richards, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 93, 1182–1194, (2009).
- [8] X. Huang, S. Han, W. Huang, X. Liu, *Chem. Soc. Rev.*, 42, 173–201, (2013).
- [9] J. Liu, K. Wang, W. Zheng, W. Huang, C. Li, X. You, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 21, 668–675, (2013).
- [10] R. Rothmund, S. Kreuzer, T. Umondum, G. Meinhardt, T. Fromherz, W. Jantsch, *Energy Procedia.*, 10, 83–87, (2011).
- [11] C.P. Thomas, a. B. Wedding, S.O. Martin, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 98, 455–464, (2012).
- [12] D.Z. Garbuzov, S.R. Forrest, a. G. Tsekoun, P.E. Burrows, V. Bulovic, M.E. Thompson, *J. Appl. Phys.*, 80, 4644, (1996).
- [13] Z. Cheng, F. Su, L. Pan, M. Cao, Z. Sun, *J. Alloys Compd.*, 494, 7–10, (2010).
- [14] D. Ross, E. Klampaftis, J. Fritsche, M. Bauer, B.S. Richards, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 103, 11–16 (2012).
- [15] B.S. Richards, K.R. McIntosh, *Prog. Photovolt Res. Appl.*, 15, 27–34, (2007).

در شکل ۱۹ طرحواره الکترودهای مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. بررسی عملکرد سلول‌های ساخته شده با این الکترودها نشان می‌دهد که استفاده از الکترودهای نوع ۲، ۳ و ۴ بازده سلول خورشیدی را به ترتیب ۱۳/۵، ۶ و ۲۰/۷ درصد نسبت به بازده سلول خورشیدی ساخته شده از الکترودهای ۱ بهبود می‌بخشد [۴۰].



شکل ۱۹. طرحواره الکترودهای مورد استفاده در سلول خورشیدی با و بدون مواد نورتاپ [۴۰]

طیف IPCE سلول‌های ساخته شده (شکل ۲۰) نشان می‌دهد که با حضور ماده نورتاپ YAG:Ce، IPCE در طول موج‌های کمتر و با حضور ماده $Gd_2O_3:Er^{3+}/Yb^{3+}$ IPCE در طول موج‌های بزرگتر افزایش می‌یابد. این مشاهده با توجه به عملکرد این دو ماده نورتاپ مبنی بر جابجایی نور به سمت انرژی‌های کمتر و بیشتر به ترتیب برای YAG:Ce و $Gd_2O_3:Er^{3+}/Yb^{3+}$ قابل قبول است [۴۰].



شکل ۲۰. طیف IPCE سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگدانه N719 و ساخته شده با الکترودهای نشان داده شده در شکل ۱۹ [۴۰]

۴- نتیجه‌گیری

راهکار جابجایی طیف نور، راهکاری ساده برای افزایش بازده جذب نور در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای محسوب می‌شود. اگرچه این راهکار برای انواع دیگر سلول‌های خورشیدی از جمله سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و لایه نازک مورد استفاده قرار گرفته است، به دلیل امکان استفاده از طیف وسیعی از رنگدانه‌ها با طیف جذب متنوع در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای این راهکار به‌ویژه برای افزایش بازده جذب نور سلول خورشیدی رنگدانه‌ای مناسب به نظر می‌رسد. از سوی دیگر،



- Huang, J. *Power Sources*, 195, 6937–6940, (2010).
- [37] H. Hafez, M. Saif, M.S. a. S.A. Abdel-Mottaleb, J. *Power Sources*, 196, 5792–5796, (2011).
- [38] Z. Hosseini, W.-K.K. Huang, C.-M.M. Tsai, T.-M.M. Chen, N. Taghavinia, E.W.-G.G. Diau, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5, 5397–402, (2013).
- [39] Y. Li, K. Pan, G. Wang, B. Jiang, C. Tian, W. Zhou, Y. Qu, S. Liu, L. Feng, H. Fu, *Dalt. Trans.*, 42, 7971–7979, (2013).
- [40] M.J. Lim, Y.N. Ko, Y. Chan Kang, K.Y. Jung, *RSC Adv.*, 4, 10039, (2014).
- [16] E. Klampaftis, D. Ross, S. Seyrling, A.N. Tiwari, B.S. Richards, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 101, 62–67, (2012).
- [17] B. Hong, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 80, 417–432, (2003).
- [18] S.D. Hodgson, W.S.M. Brooks, A.J. Clayton, G. Kartopu, V. Barrioz, S.J.C. Irvine, *Nano Energy*, 2, 21–27, (2013).
- [19] D. Alonso-álvarez, D. Ross, B.S. Richards, *Proceeding Photovolt. Spec. Conf.*, 5989, 5989, (2009).
- [20] G. Seybold, *Dye. Pigment*, 11, 303–317, (1989).
- [21] W.G.J.H.M.G.J.H.M. van Sark, a. Meijerink, R.E.I.E.I. Schropp, J. a. M. van Roosmalen, E.H. Lysen, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 87, 395–409, (2005).
- [22] C. Strumpel, M. McCann, G. Beaucarne, V. Arkhipov, A. Slaoui, V. Svrcek, C. Del Canizo, I. Tobias, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 91, 238–249, (2007).
- [23] W. Yen, M. Weber, *Inorganic phosphors: compositions, preparation and optical properties*, CRC Press, 2004.
- [24] H.J. Hovel, R.T. Hodgson, J.M. Woodall, *Sol. Energy Mater.*, 2, 19–29, (1979).
- [25] Z. Zhou, J. Wang, F. Nan, C. Bu, Z. Yu, W. Liu, S. Guo, H. Hu, X.-Z. Zhao, *Nanoscale*, 6, 2052–5, (2014).
- [26] G.-B. Bin Shan, G.P. Demopoulos, *Adv. Mater.*, 22, 4373–7, (2010).
- [27] G.-B. Shan, H. Assaoudi, G.P. Demopoulos, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 3, 3239–3243, (2011).
- [28] B.S. Richards, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 90, 1189–1207, (2006).
- [29] T. Trupke, M.A. Green, P. Würfel, *J. Appl. Phys.*, 92, 1668–1674, (2002).
- [30] B.S. Richards, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 90, 2329–2337, (2006).
- [31] V. Badescu, A. De Vos, *J. Appl. Phys.*, 102, 073102, (2007).
- [32] R. Rothmund, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 120, 616–621, (2014).
- [33] a. Boccolini, J. Marques-Hueso, D. Chen, Y. Wang, B.S. Richards, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 122, 8–14, (2014).
- [34] J. Liu, Q. Yao, Y. Li, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 173119, (2006).
- [35] D. Li, C. Ding, H. Shen, Y. Liu, Y. Zhang, M. Li, J. Yan, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 43, 015101, (2010).
- [36] J. Wu, G. Xie, J. Lin, Z. Lan, M. Huang, Y.



Photon Management in Dye Sensitized Solar Cell Using Photon Conversion Layer

Zahra Hosseini*

Faculty of Advanced Technologies, Shiraz University

Abstract:

Incident photon conversion is an effective strategy to compensate the low absorption in dye sensitized solar cell (DSSC). Photon conversion strategy can be done using luminescent materials. The luminescent material should absorb photons in wavelength range which the DSSC has low external quantum efficiency, while it should emit photons in wavelength range which the DSSC has high external quantum efficiency. This strategy is more applicable to DSSC compared to other kinds of solar cell due to the vast variety of the dye molecules used in DSSC. In addition, the transparency of the DSSC provides the opportunity to apply the photon conversion layer in different architectures; inside or outside the DSSC. In this article, the photon conversion strategy and its requirements are discussed. Different DSSC structures with photon conversion layer and suitable luminescent materials are also introduced. The results show that the choice of the luminescent material for each structure is the most important parameter governing the performance of the DSSC with photon conversion Layer.

Keywords: Dye sensitized Solar Cell, Photon Management, Photon Conversion, Quantum Dot, Luminescence.