



مروری کوتاه بر اصلاح طیفی نور خورشید با استفاده از تبدیل کاهشی لومینسانس به منظور افزایش بازده سلول های خورشیدی

حسین دلاوری امرئی^{۱*}، جعفر شهريور قوزولو^۲

۱- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران
 ۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 *h.delavari@ub.ac.ir، ۱۳۳۹

چکیده

اصلاح طیفی (تبدیل طیفی) نور، نوعی از تکنیک مدیریت فوتون ها به منظور افزایش بازده سلول های خورشیدی می باشد. روش های متفاوتی جهت تغییر انرژی و طول موج فوتون ها وجود دارد که شامل: ۱- تبدیل فوتون هایی با انرژی کمتر و طول موج بیشتر به فوتون هایی با انرژی بیشتر و طول موج کمتر؛ ۲- تبدیل فوتون هایی با انرژی بیشتر و طول موج کمتر به فوتون هایی با انرژی کمتر و طول موج بیشتر. روش دوم به یکی از دو مکانیسم تبدیل کاهشی (DC) و فوتولومینسانس قابل انجام می باشد. استفاده از لایه تبدیل کننده کاهشی لومینسانس (LDS) راهکاری برای عملی کردن استفاده از روش دوم و بهبود پاسخ طیفی ضعیف سلول های خورشیدی در طول موج های کوتاه نور می باشد. لایه LDS قادر است تا فوتون های در محدوده ۳۰۰-۵۰۰ nm را جذب کرده و آن را در طول موج بالاتر که در آن سیستم فوتولتائیک پاسخ بهتری نشان می دهد، باز نشر کند. این مقاله مروری کوتاهی بر انواع تکنیک های اصلاح طیفی، مواد مورد استفاده در ساخت لایه LDS (اعم از مواد میزبان و تبدیل کننده طیفی) و تاثیر آن بر بازدهی سلول های خورشیدی مختلف می باشد. همچنین مسیر حرکت فوتون ها در یک لایه LDS مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژگان: اصلاح طیفی، تبدیل کاهشی لومینسانس، سلول خورشیدی، بازده.

Spectral conversion of light using luminescent down-shifting for enhancing the performance of solar cells – A short review

Hossein Delavari Amrei^{1*}, Jafar Shahrivar Guzullo²

1- Department of chemical engineering, Faculty of engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

2- School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1339 Bojnord, Iran, h.delavari@ub.ac.ir

Abstract

Spectral modification (spectral conversion) of light is a type of practical photon management technique to enhance solar cells performance. There are different methods for changing of energy and wavelength of photons: 1- Conversion of photons with low energy and long wavelength to photons with high energy and short wavelength; 2- Conversion of photons with high energy and short wavelength to photons with low energy and long wavelength. There are two mechanisms for second method: Down conversion (DC) and photoluminescence. Using luminescent down-shifting (LDS) layer is a strategy for practical use of second method and improving the poor spectral response of solar cells to short-wavelength light. The LDS layer absorbs photons in the 300–500 nm range, and re-emits them at longer wavelengths where the photovoltaic (PV) device exhibits a better response. This paper is a short review of different technique for spectral modification, materials that using for construction of LDS layer (host materials and converters) and effect of the application of LDS on the performance of different solar cells. Also, light pass in a LDS layer was studied.

Keywords: Spectral conversion, Luminescent down-shifting, solar cell, performance



۱ - مقدمه

به صدا درآمدن زنگ خطر کاهش منابع اصلی انرژی در سطح جهان باعث شده است تا جستجو به منظور یافتن منابع تجدید پذیر که قابلیت تامین انرژی در آینده را دارند، آغاز گردد. بر اساس نتایج بدست آمده از اقتصاد بازار در سراسر جهان، افزایش تقاضا برای انرژی باعث شده است تا قیمت منابع قابل احتراق طبیعی افزایش قابل توجهی را نشان دهد. در واقع پیش بینی می‌شود به علت بالا رفتن تقاضا برای انرژی در آینده- ای نزدیک منابعی همچون نفت، گاز، ذغال سنگ و دیگر منابعی که تا کنون به عنوان منبع اصلی انرژی بوده اند، دیگر قابلیت تامین انرژی را در این سطح گسترده نخواهند داشت [۱]. به همین دلیل پژوهش‌های گسترده‌ای در محیط‌های آکادمیک و صنعتی به منظور یافتن منابع جایگزین در جریان می‌باشد.

با پیشرفت دانش بشری در زمینه ساخت سلول‌های فتوولتائیک، قابلیت تبدیل مستقیم این انرژی به جریان الکتریکی میسر شده است. در حال حاضر دو فناوری نسل اول و دوم در ساخت سلول‌های خورشیدی وجود دارد. فناوری نسل اول بر پایه ویفرهای سیلیکونی به ضخامت $400\ \mu\text{m}$ - $300\ \mu\text{m}$ است که ساختاری بلوری یا چند بلوری دارند و در فناوری نسل دوم نیمه هادی روی بسترهای شیشه‌ای، فلزی یا پلیمری به ضخامت $5\ \mu\text{m}$ - $3\ \mu\text{m}$ لایه نشانی می‌شود. باید به این نکته توجه داشت که حد کارنو برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی 95% می‌باشد در حالی که بازدهی سلول‌های خورشیدی نسل اول و دوم در بهترین حالت حداکثر 30% گزارش شده است [۲]. بنابراین باید راهکارهایی وجود داشته باشد تا بازده یک سلول خورشیدی را هر چه بیشتر به مقدار تئوری آن نزدیک گرداند، یعنی 2 تا 3 برابر مقدار کنونی آن. سلول‌هایی که دارای چنین میزان بازدهی باشند، نسل سوم سلول‌های خورشیدی نامیده می‌شوند. سلول‌های متوالی، سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی، سلول‌های خورشیدی نقطه کوانتومی، سلول‌های حامل داغ. همچنین افزایش بازدهی سلول‌های نسل اول و دوم با استفاده از مواد تبدیل کننده طیفی مفهومی است که جز مفاهیم موجود در نسل سوم سلول‌های خورشیدی طبقه بندی می‌شود [۲-۴].

اصلاح طیفی یا تبدیل طیفی یکی از موضوعات مطرح تحقیقاتی در فیزیک و شیمی می‌باشد که به عنوان مثال می‌توان به شمارنده کوانتومی مادون قرمز یا لامپ‌های فسفری پربازده اشاره نمود [۵، ۶]. در حالی که بازده سلول‌های خورشیدی کلاسیک چیزی در حدود 30% می‌باشد، استفاده از تکنیک اصلاح طیفی می‌تواند باعث بهبود بازده سلول تا 37% شود [۷]. همچنین اخیراً از تکنیک اصلاح طیفی به منظور افزایش بازده فوتوسنتز نیز استفاده شده است [۸-۱۲]. در تمامی این موارد سعی بر آن بوده است تا فوتون‌ها به محدوده طیفی‌ای انتقال یابند که بازده سلول فتوولتائیک یا فوتوسنتز کننده مورد نظر در آن ناحیه بیشتر باشد.

با توجه به گستردگی تحقیقات صورت گرفته در زمینه افزایش بازده سلول‌های خورشیدی به وسیله مواد تبدیل کننده طیفی که طول موج- های پایین طیف خورشید را تبدیل به طول موج‌های بالاتر (و مناسب سلول) تبدیل می‌کنند، در این کار به بررسی روش به کارگیری لایه تبدیل کننده کاهشی لومینسانس (LDS)، مسیر حرکت فوتون‌ها و نوع مواد به کار رفته در آن پرداخته شد. در واقع از پرداختن به متمرکز کننده‌های نوری لومینسانس (به علت گستردگی کمتر کار تحقیقاتی در

مورد آنها) و تبدیل کننده‌های افزایشی (به علت پایین بودن بازده کوانتومی مواد دارای این قابلیت و تحقیقات کمتر صورت گرفته در مورد آنها) اجتناب شده و تنها به توضیح مختصری درباره آنها بسنده شده است.

۲- روش‌های مختلف به کارگیری اصلاح کننده‌های طیفی

در مورد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی سه مورد اتلاف وجود دارد که با استفاده از مواد تبدیل کننده طیفی می‌توان میزان آن را کاهش داد. اولین آنها اتلاف حرارتی می‌باشد. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که یک جفت الکترون- حفره با انرژی بیشتر از گاف انرژی سیلیکون به وجود بیاید. بدین ترتیب انرژی اضافی به صورت گرما اتلاف خواهد شد؛ چراکه الکترون (و حفره) به لبه‌های باند رسانش (و ظرفیت) تنزل می‌یابد. اتلاف گرمایی را می‌توان با استفاده از تبدیل کاهشی (DC) رفع نمود. بدین صورت که، به عنوان مثال، یک فوتون با انرژی دو برابر گاف انرژی به دو فوتون که هریک دارای انرژی برابری با گاف انرژی هستند، تبدیل شود. دومین مکانیسمی که باعث اتلاف می‌شود ایجاد مجموعه ناقص به علت بازترکیب در سطح یا نزدیک به آن است. به همین دلیل فوتون‌های دارای انرژی زیاد در این منطقه جذب شده و تحت تاثیر قرار می‌گیرند و باعث پاسخ طیفی کاهش یافته‌ای در طول موج‌های پایین‌تر می‌شوند. این اتلاف را می‌توان با استفاده از فوتولومینسانس کاهش داد. به این صورت که فوتون‌ها به محدوده‌ای انتقال داده می‌شوند که در آن سلول دارای پاسخ طیفی مناسبتری است. به عنوان نمونه، برای سلول‌های خورشیدی صنعتی فوتولومینسانس می‌تواند مفید باشد، اگر طول موج های کوتاهتر از حدود $500\ \text{nm}$ به محدوده طول موجی $1000\ \text{nm}$ - $500\ \text{nm}$ منتقل شوند. سومین مکانیسمی که سبب اتلاف می‌گردد، انتقال است. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که فوتون‌هایی با انرژی کمتر از گاف انرژی سیلیکون جذب شوند. این نوع از اتلاف با استفاده از تبدیل افزایشی (UC) یا ترکیب دو یا چند فوتون کم انرژی و ایجاد یک فوتون دارای انرژی بیشتر قابل رفع می‌باشد. [۳، ۴، ۱۳].

به منظور استفاده از مواد تبدیل کننده طیفی در افزایش بازده سلول مورد نظر، این مواد را در یک ماتریس پلیمری شفاف پراکنده نموده و نهایتاً بسته به نوع تبدیل طیفی به کار گرفته می‌شود. اگر تبدیل به طول موج های پایین تر یا UC مد نظر باشد ماتریس پلیمری مورد نظر در قسمت زیرین پانل خورشیدی به همراه یک آینه تعبیه می‌شود. در این حالت فوتون‌هایی که با طول موج بالا (در این حالت امواج IR مد نظر می‌باشد) جذب سلول خورشیدی نمی‌شوند، پس از عبور از آن به لایه تبدیل کننده طیفی برخورد کرده و به فوتون‌هایی با انرژی بیشتر تبدیل می‌گردند و با کمک آینه موجود انعکاس داده شده و به سلول برگردانده می‌شوند. این فوتون‌ها با توجه به این که در محدوده جذب سلول خورشیدی قرار دارند توسط آن جذب می‌شوند تا به این ترتیب UC بازده سلول مورد نظر را افزایش دهد [۱۳، ۱۴]. در شکل ۱ این فرایند به صورت شماتیک نشان داده شده است. سلول‌های خورشیدی به کار رفته در این تکنیک دو طرفه می‌باشند.

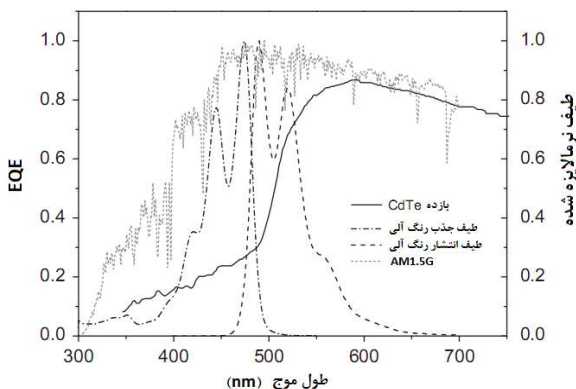


همانطور که عنوان شد با توجه به گستردگی تحقیقات صورت گرفته در زمینه LDS به علت سهولت به کارگیری آن و وجود تعداد بسیاری از مواد تبدیل کننده طیفی که دارای بازدهی کوانتومی بالا و پایداری نوری مناسب می‌باشند، در ادامه به آن پرداخته شده است.

۳- تبدیل کننده کاهشی لومینسانس (LDS)

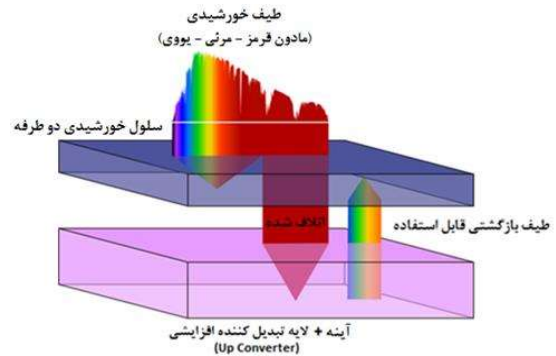
افزایش پاسخ طول موج‌های کوتاه در سلول‌های فتولتائیک اولین بار در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی در متمرکز کننده‌های نوری لومینسانس (LSCs) (مشابه آنچه که در شکل ۲-ب آمده است) به کار گرفته شد [۱۷، ۱۸]. هُوَل و همکاران [۱۹] اولین افرادی بودند که مفهوم LDS را در مورد یک صفحه لومینسانس تخت که بر روی یک سلول فتولتائیک قرار گرفته است، به کار گرفتند (شکل ۲-الف). آنها به نتایج مورد تحسینی در اولین تلاش خود دست یافتند. البته باید به این نکته توجه نمود بازده سلول‌های خورشیدی مورد استفاده آنها در آن زمان و همچنین کیفیت مواد تبدیل کننده طیفی، با امروز متفاوت بوده است. امروزه علاوه بر بازده کوانتومی سلول‌های خورشیدی، بازده کوانتومی مواد تبدیل کننده طیفی نیز افزایش یافته است.

یک مثال ساده از چگونگی عملکرد فرایند LDS که باعث جابجایی بخشی از طول موج‌ها به محدوده‌ای که در آن بازده کوانتومی خارجی (EQE) سلول بیشتر است، در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که در این شکل آمده است، برای سلول کادمیم-تلوراید (CdTe)، EQE در طول موج‌های کمتر از ۵۵۰ nm به شدت کاهش یافته است. استفاده از یک رنگ آلی فلورسانس که در $\lambda < 500 \text{ nm}$ دارای قابلیت جذب و در $\lambda > 500 \text{ nm}$ دارای قابلیت نشر مناسبی می‌باشد، باعث می‌شود تا قسمتی از تشعشعات ورودی موجود در محدوده‌ای که در آن بازده سلول کم می‌باشد (EQE: ۰-۲۵٪) به محدوده‌ای منتقل شود که در آن بازده سلول بالاتر می‌باشد (EQE: ۳۰-۸۰٪) و بدین ترتیب بازده سلول افزایش می‌یابد. همچنین به منظور آگاهی از میزان فوتون واقعی در دسترس در مثال مورد نظر، توزیع طیفی شار فوتون برای حالت AM1.5 طیف خورشیدی در شکل ۳ آورده شده است.



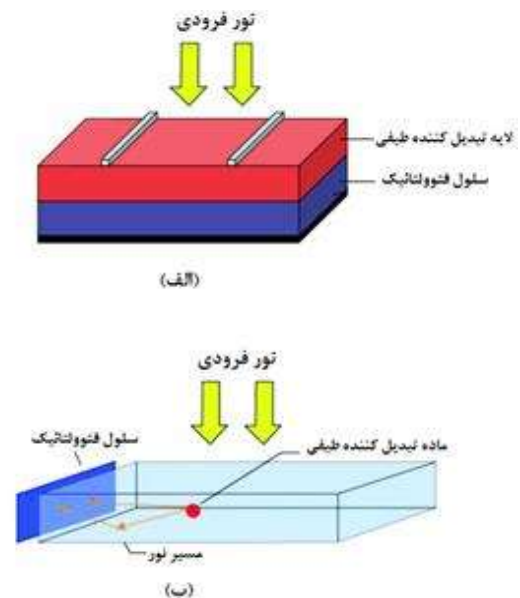
شکل ۳. مثالی از چگونگی عملکرد LDS [۳].

۳-۱- بررسی مسیر فوتون‌ها در LDS



شکل ۱. استفاده از UC در یک سلول خورشیدی دو طرفه [۱۵].

اگر تبدیل به طول موج‌های بالاتر (مد نظر باشد همانطور که بیان شد از دو مکانیسم DC و فوتولومینسانس می‌توان استفاده نمود. دو روش (شکل ۲، الف و ب) مختلف به منظور استفاده از این دو مکانیسم در متون علمی پیشنهاد داده شده است. در استراتژی اول (شکل ۲-الف) ماتریس شفاف که در آن ماده تبدیل کننده طیفی پراکنده شده است بر روی سلول مورد نظر قرار داده می‌شود تا به این ترتیب فوتون‌های پر انرژی پس از برخورد به ماتریس یا همان لایه تبدیل کننده طیفی به فوتون‌های کم انرژی تری تبدیل شده و نهایتاً توسط سلول جذب شوند. به لایه اعمال شده بر روی سلول در این حالت لایه تبدیل کننده کاهشی لومینسانس گفته می‌شود [۳، ۴]. در روش دوم (شکل ۲-ب) ماتریس مورد نظر دارای ضخامت قابل توجهی می‌باشد یا می‌توان گفت نسبت ضخامت ماتریس به مساحت سطحی که مقابل نور قرار دارد، قابل توجه است. این امر باعث می‌شود تا اکثر نور فلورسانس شده یا تبدیل شده از لبه‌های ماتریس خارج شود. در واقع در این حالت ماتریس مورد نظر به صورت یک متمرکز کننده نوری عمل می‌نماید و سلول‌های فتولتائیک بر روی لبه‌های این ماتریس تعبیه می‌شوند. به این نوع از متمرکز کننده ها، متمرکز کننده نوری لومینسانس (LSC) گفته می‌شود [۱۶].



شکل ۲. روش‌های به کارگیری موادی که با افزایش دادن برخی از طول موج‌های فرودی، بازده سلول خورشیدی را افزایش می‌دهند. الف) LDS؛ ب) LSC



شده) مسیر f را انتخاب کرده و از بالای لایه خارج گردند. در صورتی که ضریب شکست لایه تبدیل کننده برابر ۱/۵ باشد (برای اکثر پلیمرهای تجاری این عدد تقریباً صادق است)، حدود ۱۲/۵٪ از فوتون‌های تبدیل شده از بالای لایه خارج شده و مورد استفاده سلول قرار نمی‌گیرند [۱۹].

جدول ۱. اتلاف از لایه‌ها برای لایه‌های (LDS) که دانسیته نوری رنگ در آن برابر با ۲ می‌باشد ($OD=2$) [۲۲].

ضخامت (cm)	درصد اتلاف از لایه‌ها در مساحت مشخص			
	۱ cm ²	۹ cm ²	۲۲۵ cm ²	۷۲۰۰ cm ²
۰/۲۵	۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۰
۰/۵	۲/۶	۱/۰	۰/۳	۰/۱
۱	۴/۳	۱/۸	۰/۵	۰/۱
۲	۶/۷	۳/۲	۰/۸	۰/۲
۴	۸/۹	۵/۱	۱/۵	۰/۳

۳-۲- ماده میزبان

مشخصات مواد مورد استفاده در لایه LDS باید گونه‌ای باشد که تا حد اکثر استفاده از لایه حاصل شود. ماده میزبان مورد استفاده باید دارای خواص زیر باشد [۳]:

۱- بسیار شفاف باشد؛ مخصوصاً در محدوده‌ای که پاسخ سلول زیاد است.

۲- باعث کمترین میزان پراکندگی فوتون‌ها گردد.

۳- محیط بهینه مناسبی برای حل شدن ماده تبدیل کننده طیفی باشد.

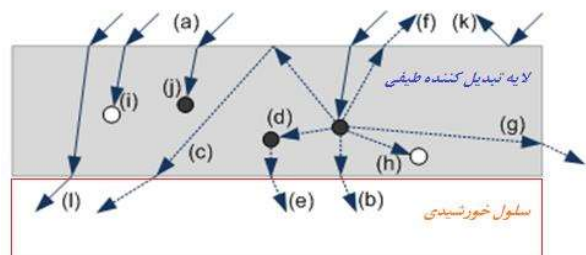
۴- دارای پایداری نوری طولانی مدت، معادل زمان عمر مفید سلول فتوولتائیک تجاری شده، باشد.

۵- بسته به نوع اعمال این لایه بر روی سلول مورد نظر، شاید نیاز باشد که این ماده قابلیت تحمل بالایی در برخی عملیات حرارتی‌ای که در ساخت سلول‌های فتوولتائیک به کار می‌رود را داشته باشد.

مواد بسیاری را می‌توان به عنوان ماده میزبان به کار گرفت که می‌توان به پلیمرهایی مانند پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA) یا پلی-وینیل-استات (PVA) اشاره نمود. همچنین مواد کریستالی معدنی مانند Al_2O_3 و CaF_2 را نیز می‌توان به این منظور به کار برد. به مواد دیگری مانند انواع مختلف شیشه‌ها، مولکول‌های سیلیکات آلی و رقیق کننده‌های رنگ آلی اشاره نمود [۱۹، ۲۴-۲۹].

مواد پلیمری دارای شفافیت بالایی در محدوده طیف مرئی می‌باشند (البته بهتر است این شفافیت در بازه گسترده‌تر ۳۵۰-۱۱۵۰ nm باشد). همچنین دارای مقاومت کافی در مقابل گرما، حرارت و تنش‌های مکانیکی بوده و محیط بسیار مناسبی رنگ‌های آلی فلورسانس می‌باشند. پلیمر مورد استفاده در لایه LDS باید دارای مقاومت مناسبی در مقابل تابش UV باشد. به همین دلیل سازندگان این پلیمرها به منظور رفع

می‌توان فرض نمود که لایه تبدیل کننده طیفی یا همان LDS یک محیط هموزن تشکیل شده از مولکول‌های ماده میزبان شفاف و مولکول‌های ماده تبدیل کننده می‌باشد. هنگامی که تعدادی از فوتون‌ها به سطح بیرونی این لایه برخورد می‌کنند، مسیرها و حالات متفاوتی برای آنها حاصل خواهد شد. همانطور که در شکل ۴ آمده است فوتون‌های ورودی به لایه (a) LDS یا جذب لایه می‌شوند (i) و یا با تبدیل شدن به طول موج‌های بالاتر یا بدون هیچ تغییری از لایه خارج شده و به سلول خورشیدی می‌رسند. اکثر فوتون‌های تبدیل شده (تغییر طیف یافته) یا مستقیماً از لایه خارج شده (b) و یا بعد از انعکاس داخلی (در صورت بزرگتر بودن زاویه برخورد از زاویه بحرانی) به علت برخورد به سطح تماس لایه و هوا از به سمت پایین لایه هدایت شده و توسط سلول جذب می‌شوند (c). این امکان وجود دارد که تعدادی از فوتون‌های تبدیل شده دوباره جذب مولکول‌های رنگدانه شده (d) و باعث برانگیختگی و انتشار مجدد نور شوند (e). تعدادی از فوتون‌های تبدیل شده از لایه (g) و یا از سطح بالایی آن خارج می‌شوند (f). به علاوه امکان جذب مقدار بسیاری از فوتون‌ها توسط ماده میزبان نیز وجود خواهد داشت (h). برخی از فوتون‌های ورودی ممکن است تنها جذب مولکول‌های رنگدانه شوند بدون آنکه باعث تحریک آن شوند (j) و یا جذب مولکول‌های میزبان شوند و یا بدون آنکه جذب شوند طول لایه تبدیل کننده را طی نموده و از آن خارج شوند (l) و یا از روی لایه در سطح تماس لایه و هوا منعکس شوند (k). بدین ترتیب با این مکانیزم ساده می‌توان به میزان اتلاف فوتون‌ها (فوتون‌های ورودی و تبدیل شده‌ای که، نهایتاً، از پایین صفحه خارج نمی‌شوند) را بدست آورد. در واقع می‌توان گفت فوتون‌های موجود در مسیرهای b و e، فوتون‌های مفید خروجی از LDS می‌باشند. همچنین درصدی از فوتون‌های موجود در مسیر l، که بدون تبدیل از لایه خارج می‌شوند، جز فوتون‌های مفید برای سلول خواهند بود [۳، ۲۰، ۲۱].



مولکول ماده تبدیل کننده طیفی ●

مولکول ماده میزبان ○

شکل ۴. مسیرهای حرکت فوتون در یک لایه تبدیل کننده طیفی (LDS)؛ خط چین‌ها مسیر فوتون‌های تبدیل طیف یافته را نشان می‌دهد.

درصد فوتون‌هایی که مسیر g را انتخاب کرده و از لایه‌های خارج شده و اتلاف می‌گردد به ضخامت لایه بستگی دارد. در جدول ۱ درصد این فوتون‌ها (یا درصد اتلاف به دلیل برای یک عبور فوتون‌ها از لایه‌های لایه تبدیل کننده) برای $OD=2$ یک نمونه از رنگ آلی فلورسانسی آورده شده است [۲۲]. می‌توان گفت با افزایش ضخامت لایه در مساحت سطح ثابت، میزان اتلاف افزایش یافته است. بنابراین به منظور اعمال لایه بر روی سلول مورد نظر باید ضخامت لایه تا حد ممکن کم باشد. همچنین همانطور که عنوان شده درصدی از فوتون‌های تبدیل شده (یا منتشر



این مشکل از مواد جذب کننده UV در ساخت این مواد استفاده می‌نمایند. در واقع مولکول‌های این مواد فوتون‌های UV را که برای پلیمر مخرب می‌باشد را جذب نموده و آن را تبدیل به حرارت می‌نمایند. نکته مهم دیگر ضریب شکست پلیمر مورد استفاده می‌باشد که باید نزدیک به ضریب شکست شیشه باشد ($n \sim 1.5$)؛ چراکه ماژول‌های فوتولتاییک معمولاً برای پوشش داده شدن با شیشه بهینه شده‌اند [۱۹، ۳۰، ۳۱].
مواد کریستالی معدنی دارای شفافیت بالایی برای تمامی طول موج‌ها بوده و از پایداری نوری بالایی برخوردار هستند. اما به هر حال گرانیقیمت بوده و کار با آنها پیچیده‌تر می‌باشد و به همین دلیل به نظر می‌رسد که تجاری سازی آنها مشکل باشد [۱۹].

۳-۳- مواد تبدیل کننده طیفی

مواد مورد استفاده در این روش که در ماده میزبان شفاف مورد نظر پراکنده شده‌اند، باید دارای ویژگی‌های زیر باشند [۳، ۳۲-۳۴]:

- ۱- دارای بازده کوانتومی بالایی باشند. یعنی نسبت فوتون‌های خارج شده از ماده به نسبت فوتون‌هایی که برای تحریک آن به کار می‌رود در محدوده مورد نظر باشد. به این ترتیب که ماده مورد نظر به ازای هر فوتونی که برای تحریک آن به کار می‌رود بتواند یک فوتون منتشر کند یا بازده کوانتومی برای این دست از مواد نزدیک به یک باشد.
- ۲- تحریک آن‌ها در محدوده‌ای باشد که سلول مورد نظر در آن محدوده دارای بازدهی پایینی است (دارای پاسخ مناسبی نباشد). با توجه به سلول‌های تجاری شده موجود و پهنای طیفی تابش خورشیدی، موادی که در محدوده ۳۵۰ تا تقریباً ۵۰۰ nm، تحریک می‌شوند، مناسب می‌باشند. بنابراین می‌توان گفت طیف جذب آن نیز باید در همین محدوده باشد.
- ۳- در محدوده‌ای که سلول مورد نظر بازدهی بالایی دارد، دارای طیف انتشاری باشد. می‌توان گفت بهتر است که طیف انتشاری در محدوده بالای ۵۰۰ nm قرار داشته باشد.
- ۴- کمترین همپوشانی بین طیف جذب و انتشاری وجود داشته باشد؛ چراکه همپوشانی بین این دو طیف باعث بازجذب برخی از فوتون‌های انتشار یافته می‌شود که باعث اتلاف می‌گردد (مسیر d در شکل ۴).
- ۵- دارای قیمت مناسبی باشد.
- ۶- دارای پایداری نوری طولانی مدت باشند.

بسیاری از مواد لومینسانس را می‌توان به منظور به کارگیری در لایه LDS به کار گرفت. این مواد را می‌توان به سه دسته نقاط کوانتومی (QDs)، رنگ‌های آلی و یون/کمپلکس‌های نادر خاکی تقسیم بندی نمود.

نقاط کوانتومی کریستال‌های نیمه رسانایی می‌باشند که قطر آن‌ها در محدوده ۱۰-۲۰ nm می‌باشد. از نظر کاربرد می‌توان گفت که طیف جذب و نشر کوانتوم ذات سنتز شده، علاوه بر نوع مواد به کار رفته در سنتز آن، به قطر آن نیز بستگی دارد. به عنوان مثال برای یک نوع خاص هر چه قطر آن افزایش یابد طیف نشر آن به سمت طول موج‌های بالاتر میل می‌کند. به طور کلی کوانتوم‌دات‌ها دارای طیف جذب پهن، شدت انتشار زیاد و پایداری نوری طولانی مدت می‌باشند. اما میزان بازجذب فوتون‌ها در این مواد به علت پهن بودن محدوده همپوشانی طیف جذب و انتشار، زیاد می‌باشد. همچنین بازده کوانتومی در این مواد کم بوده و با روش‌های فعلی سنتز آنها کمی گران قیمت است [۲۰، ۳۴]. محاسبات تئوری برای

کوانتوم داتی که در دارای ماکزیمم طیف انتشار ۶۲۰ nm بوده و در یک ماتریس پلیمری بر روی سلول خورشیدی چند بلوری قرار داشت، افزایش حدود ۱۰٪ در میزان جریان اتصال کوتاه نشان داده است [۳۴].

رنگ‌های آلی دارای بازده کوانتومی نزدیک به یک بوده و به راحتی می‌توان آن‌ها را در یک ماتریس پلیمری به کار گرفت. اما اشکال آنها کم بودن پهنای طیف جذب‌شان است؛ به علاوه اینکه دارای مقدار جابه‌جایی استوک نسبتاً کم می‌باشند که این امر باعث مقدار بازجذب قابل ملاحظه‌ای می‌گردد. در این مورد می‌توان با ترکیب برخی از رنگ‌ها در یک لایه پهنای طیف جذب را بهبود بخشید و تا میزان جابه‌جایی استوک را افزایش داد. همچنین پایداری نوری این رنگ‌ها، هنگامی که به صورت طولانی مدت در معرض UV قرار می‌گیرند در حال بررسی است، البته برخی از این رنگدانه‌ها پایداری مناسبی نشان داده اند [۳۵].

یون‌های آلی بازدهی کوانتومی بالایی دارند اما ضریب جذب آنها بسیار پایین می‌باشد. ضریب جذب را می‌توان از طریق افزایش غلظت یا ضخامت لایه یونی افزایش داد؛ یا اینکه می‌توان از یک ساختار آنتنی استفاده نمود که انرژی را جذب و به یون نادر خاکی برای انتشار طول موج جدید منتقل می‌کند [۲۰، ۳۲].

۳-۴- تاثیر به کارگیری LDS در افزایش بازده سلول خورشیدی

در جدول ۲ و ۳ تاثیر به کارگیری مواد تبدیل کننده طیفی بر میزان افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی آورده شده است. البته با توجه به نوع ماده به کار گرفته شده، میزان تاثیر متفاوت بوده است؛ چراکه هر یک از این مواد دارای بازده کوانتومی، طیف جذبی و طیف انتشاری متفاوتی می‌باشد. همچنین میزان این تاثیر با توجه نوع سلول به کار گرفته شده نیز متفاوت است؛ چراکه پاسخ هر یک از سلول‌ها در یک محدوده مشخص جذب نور به نوع مواد به کار گرفته در ساخت سلول مورد نظر و روش ساخت بستگی دارد. در این جداول به سلول سیلیکون تک کریستالی (c-Si)، سیلیکون چند کریستالی (mc-Si)، گالیوم-آرسناید (GaAs) و کادمیوم-تلورید (CdTe) اشاره شده است. در اکثر موارد به کارگیری این مواد باعث افزایش بازده سلول مورد نظر شده است. البته در برخی موارد مانند به کارگیری رودامین 6g در یک لایه LDS بر روی سلولی از جنس CdTe کاهش بازدهی مشاهده شده است (جدول ۵). علت این امر را می‌توان یکی از موارد عدم انطباق محدوده پاسخ سلول و طیف انتشاری رودامین، میزان جذب بالای طول موج‌های مفید توسط لایه LDS و نوع طیف تابش شده به سلول دانست.

جدول ۲. کاربرد مواد مختلف در افزایش بازده سلول c-Si (سیلیکون تک بلوری).

مرجع	طیف تابشی	افزایش بازده %	ماده میزبان	ماده تبدیل کننده طیفی
[۳۶]	لامپ زنون	۴۸	PMMA	¹ Rhodamine (6G), ¹ Lumogen-F (241, 339)
[۳۷]	AM1D	۲۲-۲۷	PMMA	¹ Uvitex OB, ² Hostasol (8G)



Mn ²⁺ /Eu ³⁺	شیشه فسفات	۷/۱۴	طیف خروجی از لامپ زنون
------------------------------------	------------	------	------------------------

نتیجه گیری

پتانسیل استفاده از طول موج‌های کوتاه نور به منظور افزایش بازده سلول خورشیدی با استفاده از تبدیل کاهشی لومینسانس از لحاظ مواد مورد استفاده در لایه LDS و تاثیر این لایه بر میزان بازدهی سلول مرور شد. برای یک سلول خورشیدی که لایه LDS بر روی آن قرار داده شده است در حالتی که از یک پلیمر به عنوان ماده میزبان و از رنگ آلی به عنوان ماده تبدیل کننده استفاده شده است، نتایج مناسبی در افزایش میزان بازدهی سلول گزارش شده است. در بین موارد بررسی شده بیشترین افزایش بازدهی در مورد به کارگیری لایه LDS حاوی رنگدانه آلی رودامین 6G و لوموژن F بوده است که بازده سلول سیلیکون تک بلوری را تا ۴۸٪ افزایش داده است.

به طور کلی به منظور افزایش میزان بازدهی سلول خورشیدی به وسیله روش LDS و اقتصادی شدن این روش باید ماده لومینسانس مورد نظر دارای بازدهی کوانتومی زیادی باشد و همچنین این ماده و ماده میزبان در محدوده‌ای که سلول پاسخ مناسبی دارد، باید ضریب جذب بسیار پایینی داشته باشند. به علاوه اینکه طیف نشر ماده لومینسانس در محدوده‌ای باشد که سلول پاسخ طیفی خوبی دارد و باید به این نکته توجه نمود که طیف جذب و نشر این ماده باید کمترین میزان همپوشانی را داشته باشند. لایه LDS باید دارای پایداری نوری بسیار بالایی باشد که بتوان تا سال‌ها از آن استفاده نمود و ضخامت آن تا حد امکان کم باشد تا اتلاف فوتون‌های باز نشر شده از لبه‌های آن به حداقل برسد. همچنین باید هزینه ساخت ماده لومینسانس و ماده میزبان و نهایتاً اعمال آنها بر سلول مورد نظر (به عنوان لایه LDS) پایین باشد.

مراجع

- [1] Cavasinni, V., et al., A method to study light attenuation effects in wavelength shifting fibres. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004. 517(1-3): p. 128-138.
- [2] Green, M.A., Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2002. 14(1-2): p. 65-70.
- [3] Klampafitis, E., et al., Enhancing the performance of solar cells via luminescent down-shifting of the incident spectrum: A review. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009. 93(8): p. 1182-1194.
- [4] Richards, B.S., Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Down-conversion. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006. 90(9): p. 1189-1207.
- [5] Bloembergen, N., Solid State Infrared Quantum Counters. Physical Review Letters, 1959. 2(3): p. 84.
- [6] Ronda, C.R., Phosphors for lamps and displays: an applicational view. Journal of Alloys and Compounds, 1995. 225(1-2): p. 534-538.
- [7] Green, M., Third Generation Photovoltaics, Springer, Berlin. 2003: Springer, Berlin.
- [8] Delavari Amrei, H., et al., An integrated wavelength-shifting strategy for enhancement of microalgal growth rate in PMMA- and polycarbonate-based photobioreactors. European Journal of Phycology, 2014. 49(3): p. 324-331.

Ag	شیشه فسفات	۱/۶	AM0	[۳۸]
² Eu ³⁺	PVA	۰/۸-۱	AM0	[۳۹]

^۱رنگ آلی، ^۲ ماده معدنی.

جدول ۳. کاربرد مواد مختلف در افزایش بازده سلول mc-Si (سیلیکون چند بلوری).

مرجع	طیف تابشی	افزایش بازده٪	ماده میزبان	ماده تبدیل کننده طیفی
[۴۰]	AM1.5G	۳۰-۴۰	پلاستیک ایده آل	³ CdSe
[۴۱]	AM1.5G	۰/۳۷	PMMA	¹ Lumogen-F (570, 083, 240, 300)
[۴۲]	1-5 suns	۲-۳	شیشه (G9, R7)	² Eu ³⁺

^۱رنگ آلی، ^۲ ماده معدنی، ^۳ کوانتوم دات.

جدول ۴. کاربرد مواد مختلف در افزایش بازده سلول GaAs (گالیم آرسناید).

مرجع	طیف تابشی	افزایش بازده٪	ماده میزبان	ماده تبدیل کننده طیفی
[۱۹]	AM0	۱۷	PMMA	¹ Roehm-Haas (2154), ¹ Coumarin (540), ¹ Rhodmaine (6G)
[۱۹]	AM0	۳	Al ₂ O ₃	² C ³⁺
[۴۳]	نامشخص	بدون تغییر	ZnSe	² ZnSe

^۱رنگ آلی، ^۲ ماده معدنی.

جدول ۵. کاربرد مواد مختلف در افزایش بازده سلول CdTe (کادمیم تلوراید).

مرجع	طیف تابشی	افزایش بازده٪	ماده میزبان	ماده تبدیل کننده طیفی
[۴۴]	AM1.5	تاثیر منفی داشته است	PMMA (6G)	¹ Rhodmaine (6G)
[۴۵]	AM1.5	۵	کریستال KMgF ₃	² Sm ³⁺
[۴۶]	AM1.5D	۳۳	PMMA	¹ Lumogen-F (083)
[۴۷]	لامپ زنون	۰/۱۲	borate glasses	Sm ³⁺ /Eu ³⁺
[۴۷]	لامپ زنون	۱/۳۲	borate glasses	Tb ³⁺ /Eu ³⁺

^۱رنگ آلی، ^۲ ماده معدنی

جدول ۶. کاربرد مواد مختلف در افزایش بازده سلول CdS/CdTe.

مرجع	طیف تابشی	افزایش بازده٪	ماده میزبان	ماده تبدیل کننده طیفی
------	-----------	---------------	-------------	-----------------------



- [29] Maruyama, T. and Y. Shinyashiki, Solar cell coated with fluorescent coloring agent. *J. Electrochem. Soc.* 145: p. 2955-2957.
- [30] Czanderna, A.W. and F.J. Pern, Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: a critical review, *sol. Energy Mater. Sol. C*, 1996. 43: p. 101-180.
- [31] Richard, B.S. and A. Shalav, The role of polymers in the luminescence conversion of sunlight for enhanced solar cell performance. *Synthetic Metals*, 2005. 154(1-3): p. 61-64.
- [32] Strümpel, C., et al., Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency--An overview of available materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007. 91(4): p. 238-249.
- [33] van Sark, W.G.J.H.M., Simulating performance of solar cells with spectral downshifting layers. *Thin Solid Films*, 2008. 516(20): p. 6808-6812.
- [34] van Sark, W.G.J.H.M., et al., Enhancing solar cell efficiency by using spectral converters. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005. 87(1-4): p. 395-409.
- [35] Seybold, G. and G. Wagenblast, New perylene and violanthrone dyestuffs for fluorescent collectors. *Dyes and Pigments*, 1989. 11(4): p. 303-317.
- [36] Mansour, A.F., On enhancing the efficiency of solar cells and extending their performance life. *Polymer Testing*, 2003. 22(5): p. 491-495.
- [37] Sarti, D., F. Le Poull, and P. Gravisse, Transformation du rayonnement solaire par fluorescence: Application a l'encapsulation des cellules. *Solar Cells*, 1981. 4(1): p. 25-35.
- [38] Zakhidov, R.A. and A.I. Koifman, Solar cell with a protecting coating. *Appl. Sol. Energy* 1994. 30(4): p. 22-25.
- [39] Marchionna, S., et al., Photovoltaic quantum efficiency enhancement by light harvesting of organo-lanthanide complexes. *Journal of Luminescence*, 2006. 118(2): p. 325-329.
- [40] van Sark, W.G.J.H.M., et al., Modeling improvement of spectral response of solar cells by deployment of spectral converters containing semiconductor nanocrystals. *Semiconductors*, 2004. 38(8): p. 962-969.
- [41] McIntosh, K.R., et al., Increase in external quantum efficiency of encapsulated silicon solar cells from a luminescent downshifting layer. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2008.
- [42] Yamada, K., Y. Wada, and K. Kawano, Improvement of efficiency of solar cells by application of the rare earth ions doped fluorescent glass. *Kidorui (Rare Earths)* 2000. 36: p. 252-253.
- [43] Stan, M., et al., Very high efficiency triple junction solar cells grown by MOVPE. *Journal of Crystal Growth*, 2008. 310(23): p. 5204-5208.
- [44] Byung-Chul, H. and K. Katsuyasu, Organic Dye-Doped Thin Films for Wavelength Conversion and Their Effects on the Photovoltaic Characteristics of CdS/CdTe Solar Cell. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004. 43(4R): p. 1421.
- [45] Hong, B.-C. and K. Kawano, PL and PLE studies of $KMgF_3:Sm$ crystal and the effect of its wavelength conversion on CdS/CdTe solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003. 80(4): p. 417-432.
- [46] Maruyama, T. and R. Kitamura, Transformations of the wavelength of the light incident upon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001. 69(3): p. 207-216.
- [47] Steudel, F., et al., Luminescent borate glass for efficiency enhancement of CdTe solar cells. *Journal of Luminescence*, 2015. 164: p. 76-80.
- [48] Song, P., C. Zhang, and P. Zhu, $Eu^{3+}-Mn^{2+}$ -doped bi-functional glasses with solar photon downshifting: Application to CdS/CdTe solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016. 661: p. 14-19.
- [9] Havel, H.J., R.T. Hodgson, and J.M. Woodall, The effect of fluorescent wavelength shifting on solar cell spectral response. *Sol. Energy Mater*, 1979. 2: p. 19-29.
- [10] Delavari Amrei, H., et al., Using fluorescent material for enhancing microalgae growth rate in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, 2014. 26(3): p. 1493-1500.
- [11] Mohsenpour, S.F. and N. Willoughby, Luminescent photobioreactor design for improved algal growth and photosynthetic pigment production through spectral conversion of light. *Bioresource Technology*, 2013. 142(0): p. 147-153.
- [12] Wondraczek, L., et al., Solar spectral conversion for improving the photosynthetic activity in algae reactors. *Nat Commun*, 2013. 4.
- [13] Strümpel, C., et al., Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency—An overview of available materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007. 91(4): p. 238-249.
- [14] Shalav, A., B.S. Richards, and M.A. Green, Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Up-conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007. 91(9): p. 829-842.
- [15] light, U.a.s.s.c.t.m.u.o.i.; Available from: <http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/stefan-fischer-receives-best-student-presentation-award>.
- [16] van Sark, W.G.J.H.M., Luminescent solar concentrators – A low cost photovoltaics alternative. *Renewable Energy*, 2013. 49(0): p. 207-210.
- [17] Goetzberger, A. and W. Greubel, Solar energy conversion with fluorescent collectors. *Appl. Phys.*, 1977. 14: p. 123-129.
- [18] Webber, W.H. and J. Lambe, Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cell. *Appl. Opt.*, 1976. 15: p. 2299.
- [19] Hovel, H.J., R.T. Hodgson, and J.M. Woodall, The effect of fluorescent wavelength shifting on solar cell spectral response. *Sol. Energy Mater*, 1979. 2: p. 19-29.
- [20] Rowan, B.C., L.R. Wilson, and B.S. Richards, Advanced Material Concepts for Luminescent Solar Concentrators. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2008. 14(5): p. 1312-1322.
- [21] Bendig, M., et al. Simulation of fluorescent concentrators. in *Interactive Ray Tracing*, 2008. RT 2008. IEEE Symposium on. 2008.
- [22] Richards, B.S. and K.R. McIntosh, Overcoming the poor short wavelength spectral response of CdS/CdTe photovoltaic modules via luminescence down-shifting: ray-tracing simulations. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2007. 15(1): p. 27-34.
- [23] Viehmann, W. and R.L. Frost, Thin film waveshifter coatings for fluorescent radiation converters. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979. 167(3): p. 405-415.
- [24] Inoue, S., et al., Luminescence property and application of rare earth complexes incorporated inORMOSIL matrices. *Kidorui (Rare Earth)*, 1997. 30: p. 190-191.
- [25] Kawano, K., et al., Application of rare-earth complexes for photovoltaic precursors. *Sol. Energy Mater. Sol. C*, 1997. 48: p. 35-41.
- [26] Kawano, K., N. Hashimoto, and R. Nakata, Effect of solar cell efficiency of fluorescence of rare-aerth ions. *Mater. Sci. Forum*, 1997. 239-241: p. 311-314.
- [27] Marchionna, s., et al., Photovoltaic quantum efficiency enhancement by light harvesting of organo-lanthanide complex. *J. Lumin.*, 2006. 118: p. 325-329.
- [28] Maruyama, A., K. Enomoto, and K. Shirasawa, Solar cell module colored with fluorescent plate. *Sol. Energy Mater. Sol. C*, 2000. 64(3): p. 269-278.

