

مدیریت نور در سلول های خورشیدی رنگدانه ای

نفیسه شریفی

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان

چکیده

سلول های خورشیدی رنگدانه ای، نسل سوم سلول های خورشیدی هستند که بر اساس جذب نور به وسیله ی رنگدانه کار می کنند. در این سلول ها، از مولکول های رنگدانه برای حساس سازی نیمه رساناهایی با گاف انرژی بزرگ مانند تیتانیم دی اکسید استفاده می شود. رهیافت های گوناگونی برای بهبود کارکرد سلول های خورشیدی وجود دارد که مدیریت و جمع آوری نور برای جذب مؤثر به وسیله ی رنگدانه یکی از آن ها محسوب می شود. طراحی و ساخت رنگدانه هایی با میزان جذب بالاتر و یا پهنای جذب گسترده تر؛ و یا استفاده از لایه های پراکنده نور، رهیافت هایی است که برای این منظور انجام می شوند. در این مقاله به مرور روش های گوناگونی که به این هدف انجام گرفته است؛ می پردازیم.

واژه های کلیدی: سلول خورشیدی رنگدانه ای، مدیریت فوتون

sharifi@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

به دلیل افزایش جمعیت، با افزایش جهانی مصرف انرژی به خصوص در کشورهای در حال توسعه مواجه ایم. بنابراین یکی از بزرگ ترین چالش های روبه روی بشر؛ جایگزینی سوخت فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر است. انرژی خورشیدی؛ منبعی پاک و ارزان است که استفاده از آن در سلول های خورشیدی؛ پاسخی معقول برای تامین انرژی است. سلول خورشیدی رنگدانه ای [۱] متشکل از فوتون آند و کاتود مقابل (کاتد) است که فوتون آند مجموعه شیشه ی رسانا پوشش داده شده با لایه ی تیتانیم دی اکسید و رنگدانه جذب شده بر روی سطح تیتانیم دی اکسید است. الکترود مقابل حاوی نانوذره های پلاتین است که به عنوان کاتالیز در انجام واکنش شیمیایی که در داخل الکترولیت روی می دهد؛ عمل می کند. رنگدانه وظیفه حساس کردن لایه ی متخلخل تیتانیم دی اکسید نسبت به نور خورشید را دارد که با پیوند شیمیایی به سطح تیتانیم دی اکسید متصل می شود تا با جذب نور خورشید، برانگیخته شود و الکترون رنگدانه به تیتانیم دی اکسید تزریق شود. الکترون تزریق شده از رنگدانه به داخل لایه ی تیتانیم دی اکسید از میان شبکه ی ذره های تیتانیم دی اکسید می گذرد و به زیرلایه ی شفاف و رسانا منتقل می شود. فضای میان دو الکترود و حفره های داخل لایه ی متخلخل تیتانیم دی اکسید معمولا با الکترولیت مایعی که حاوی گونه های اکسایشی- کاهشی است؛ پر می شود که حفره را از مولکول رنگ اکسید شده به الکترود مقابل منتقل می کنند.

۲- افزایش و بهبود جذب نور در سلول های خورشیدی رنگدانه ای

بازده کوانتومی خارجی (بازده تبدیل فوتون به جریان الکتریکی) به بازده جذب نور η_{LH} ؛ بازده تزریق الکترون از رنگدانه به نوار رسانش اکسید نیمه رسانا، η_{inj} ؛ و بازده جمع آوری الکترون، η_{coll} ؛ بستگی دارد. تحقیقات گسترده ای به منظور بهبود کارکرد و افزایش بازده سلول های خورشیدی رنگدانه ای در حال انجام است. یکی از رهیافت ها، مدیریت نور است که به معنای استفاده از روش هایی است که با آن بتوان مسیر نور در داخل سلول های خورشیدی را به گونه ای کنترل کرد تا با در نظر داشتن تمام محدودیت های طراحی سلول؛ تعداد فوتون های جذب شده افزایش یابد [۲]. در این مقاله به مرور کارهای انجام شده برای بهبود عملکرد سلول خورشیدی؛ از دیدگاه مدیریت نور پرداخته می شود.

۱-۲- افزایش و بهبود جذب نور با استفاده از لایه متخلخل نیمه رسانا

از آن جایی که سطح مقطع نوری مولکول رنگدانه در مقایسه با مساحتی که اشغال می کند اندک است، جذب نور به وسیله ی یک تک لایه از مولکول های رنگدانه قابل ملاحظه نیست. بنابراین، بازده فوتوولتائیک نیمه رسانا با سطح صاف و بدون تخلخل، اندک است که لایه های متخلخل و نانو ساختاری با زبری و سطح زیاد، این نقص را جبران می کنند و میزان جمع آوری نور را افزایش می دهند [۳]. بنابراین در کنار وظیفه ی دریافت الکترون از رنگدانه ی تحریک شده، و هدایت و جمع آوری الکترون ها؛ این لایه در میزان جمع آوری نور نیز نقش دارد.

به منظور بهبود جذب نور می توان با اصلاح و یا ساخت رنگدانه های مناسب تر؛ فرآیند جذب نور را کارآمدتر کرد و یا با مدیریت نور و استفاده بیش تر از نور دریافتی؛ می توان بازده جذب نور و در نتیجه جریان تولید شده به وسیله ی سلول را افزایش داد که در ادامه راه کارهای ارائه شده، مرور می شوند.

۲-۲- مهندسی رنگدانه (حساس کننده)

برای انتقال الکترون از رنگدانه به تیتانیم دی اکسید، به ۵۰ تا ۱۰۰ میلی الکترون-ولت نیروی پیرشان نیاز است [۴]. از طرفی، سلول بایستی بدون اتلاف قابل ملاحظه ای در عملکرد، به مدت ۲۰ سال (این زمان قابلیت ۵۰ تا ۱۰۰ میلیون بار اکسایش و بازتولید رنگدانه را دارد) قابل استفاده باشند. بنابراین برای بهبود جذب، مهندسی هایی روی مولکول رنگدانه های مبتنی بر Ru که پایداری بالایی دارند، انجام شده است. N3 [۵] و N719 [۶] هم جذب کننده های خوب نور و هم انتقال دهنده های مناسبی برای الکترون محسوب می شوند. Black dye [۷] نیز عملکردی مشابه N3 دارد. مساحتی که رنگدانه اشغال می کند، چند صد برابر سطح مقطع نوری رنگدانه است. پس بایستی مساحت سطحی الکترود نوری متخلخل باشد تا میزان جذب نور به وسیله ی رنگدانه قابل ملاحظه باشد. نیمه رسانا نیز بایستی آلایندگی نوع n داشته باشد تا الکترون از رنگدانه به آن تزریق شود و الکترون نتواند به رنگ تحریک شده برگردد. وجوهی از ذره های تیتانیم دی اکسید با فاز بلوری آناز نیز که در معرض رنگدانه قرار می گیرد تا رنگدانه روی آن جذب شود، سطوح (۱۰۱) است [۸].

برای یک لایه ۱۰ میکرومتری متشکل از ذره های ۲۰ نانومتری، نسبت سطح واقعی لایه به سطح هندسی آن، ۱۰۰۰ است و به دلیل کوچک بودن ذره های



برابر با ۲۳/۷٪ پیش‌بینی می‌کند. بنابراین از آن جایی که تولید فوتوالکترون برای شروع چرخه‌ی سلول خورشیدی نانو ساختار بر عهده‌ی حساس‌کننده است، مطالعه‌های گسترده‌ای روی رنگدانه‌ها انجام می‌شود [۹]، [۱۰].

۳-۲- طراحی و ساخت رنگدانه‌هایی با ضریب جذب بالاتر

برای بازده جمع‌آوری نور، η_{LH} داریم:

$$\eta_{LH} = 1 - e^{-\alpha d} \quad (2)$$

که α ضریب جذب و d ضخامت لایه است و $\alpha = C\varepsilon$ که ε ضریب جذب مولی و C غلظت محلول است. استفاده از رنگدانه‌هایی با ضریب جذب بالاتر، بازده جذب نوری را به ویژه در محدوده طول موج بیشینه جذب بهبود می‌دهد. برای داشتن بازده جذب قابل قبول، برای رنگدانه N719 با ضریب جذب مولی $M-1\text{cm}^{-1}$ ۱۴۰۰۰، لایه‌ی متخلخل با ضخامت ۱۰ میکرومتر نیاز است. بنابراین با افزایش ۱۰ برابری ε ، ضخامت لایه را می‌توان تا ۱۰ مرتبه کاهش داد تا تراپد الکترود راحت‌تر انجام شود. جدول ۱ ضریب جذب مولی و بازده را برای رنگدانه‌های گوناگون نشان می‌دهد.

جدول ۱ ضریب جذب مولی و بازده برای رنگدانه‌های گوناگون

نوع رنگدانه	رنگدانه	ضریب جذب مولی ($M-1\text{cm}^{-1}$)	بازده (%)	مرجع
مبتنی بر روتنیوم	N719	۱۴۰۰۰ (۵۳۵ nm)	۱۱/۱۸	[۶]
مبتنی بر روتنیوم	Z907	۱۳۰۰۰ (۵۲۵ nm)	۱۰/۸	[۱۱]
مبتنی بر روتنیوم	Black Dye	۹۷۰۰ (۶۱۰ nm)	۱۱/۱	[۷]
آلی	D205	۵۳۰۰۰ (۵۲۳ nm)	۹/۴	[۱۲]، [۱۳]

خورشیدی رنگدانه‌ای به کار گرفته می‌شوند. با توجه به این نکته که نقاط کوانتومی در الکترولیت‌های متداول یدی ناپایدارند و پلاتین به عنوان کاتالیست در این نوع سلول‌های خورشیدی به کار نمی‌رود، معمولاً از پلی سولفید به عنوان الکترولیت [۱۴] و از طلا به عنوان الکترود مقابل [۱۵]، [۱۶] استفاده می‌شود. از آن جایی که شکاف انرژی نانوذره‌ها به اندازه‌ی آن‌ها وابسته است، تنظیم اندازه‌ی ذره‌های کوانتومی اهمیت ویژه‌ای دارد تا با توجه به اندازه‌ی آن‌ها، فوتون‌ها در محدوده‌ی وسیعی از طیف خورشید یا در ناحیه‌ی باریکی جذب شوند [۱۷]، [۱۸].

۴-۲- مدیریت نور با استفاده از لایه‌ی پراگنده نور

اوسامی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داده است که با استفاده از لایه‌ی پراگنده، علاوه بر افزایش طول مسیر فوتون‌ها، محدود شدن نور که ناشی از بازتاب کلی در داخل سلول است، می‌تواند جذب نور را در سلول خورشیدی افزایش دهد که اثر محدود شدن نور بیش از اثر افزایش طول مسیر فوتون‌ها کارآمد است. با استفاده از محدود شدن نور، جذب نور در مجاور شیشه‌ی شفاف رسنا (جایی که الکترودها بدون بازترکیب، می‌توانند نفوذ کنند و به زیرلایه منتقل شوند) نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، محدود شدن نور می‌تواند نویدبخش کاهش ضخامت لایه و در نتیجه کاهش میزان رنگدانه مصرفی باشد و هزینه‌ی ساخت سلول خورشیدی را کاهش دهد [۱۹]. وارگاس

تشکیل‌دهنده، لایه شفاف است و میزان پراکندگی، قابل صرف نظر کردن است. بنابراین، قانون لامبرت - بیر را می‌توان به کار برد.

$$\alpha = \sigma c, \quad \sigma = \varepsilon \times 1000 [\text{cm}^2/\text{mol}] \quad (1)$$

که α مقدار جذب نور، C غلظت رنگدانه و σ ضریب خاموشی است. با فرض پوشش‌دهی تک لایه‌ای و کامل از رنگدانه روی سطح تیتانیوم دی‌اکسید، مقدار رنگدانه جذب شده برای لایه مورد نظر، $3 \times 10^{-4} \text{ mol.cm}^{-1}$ است و با توجه به مقدار ضریب خاموشی در نزدیکی بیشینه جذب رنگدانه که برابر با $3 \times 10^4 \text{ mol.cm}^{-1}$ تا $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ است؛ مقدار جذب، $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ تا $4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ به دست می‌آید. با توجه به این که طول جذب، عکس مقدار ضریب خاموشی است، طول جذب برابر با ۲/۵ تا ۵ میکرومتر به دست می‌آید. با در نظر گرفتن لایه ۶ میکرومتری و با استفاده از رابطه بازده جمع‌آوری نور در نزدیکی طول موج بیشینه رنگدانه، بازدهی بیش از ۹۰٪ به دست می‌آید که نشان می‌دهد رنگدانه‌های متداول در محدوده‌ای که جذب نوری مناسبی دارند، به خوبی وظیفه‌ی خود را انجام می‌دهند.

با فرض داشتن جذب کننده ایده‌آل نور که قادر به جذب تمامی فوتون‌های دریافتی باشد و با فرض آستانه انرژی برابر با ۱/۳ تا ۱/۴ الکترون-ولت ($890-940 \text{ nm}$)، حد ترمودینامیکی بازده شاکلی کوپسر در $AM1/5$ ، بازده را

۴-۲- طراحی و ساخت رنگدانه‌هایی با پهنای جذب وسیع‌تر

از رهیافت‌هایی که برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای به کار گرفته می‌شود؛ افزایش گستره‌ی طیف جذب رنگدانه است که این کار با ساخت رنگدانه‌های جدید و یا با استفاده از چندین رنگدانه به طور هم‌زمان روی سطح تیتانیوم دی‌اکسید جذب شده‌اند، میسر است. این رهیافت‌ها سبب می‌شوند تا تعداد فوتون‌های دریافتی به وسیله رنگدانه افزایش یابد. با مهندسی مولکول رنگدانه و تغییر ساختار از N3 به مولکول Black Dye، گستره‌ی جذب رنگدانه برای رنگدانه‌ی Black Dye تا طول موج ۹۰۰ نانومتر افزایش می‌یابد که در نهایت، به صورت بهبود در بازده کوانتومی خارجی مشاهده می‌شود.

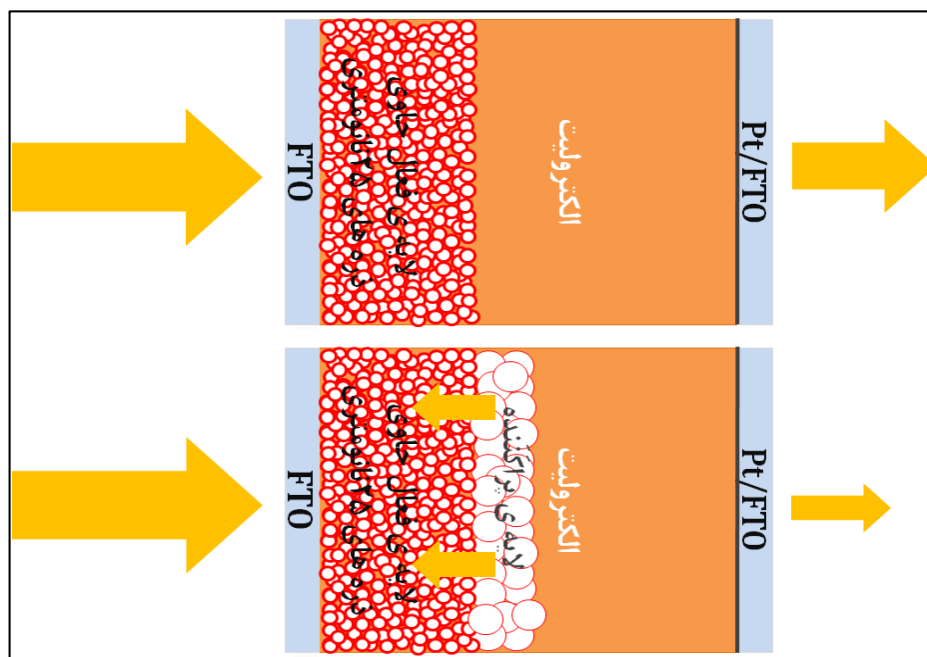
روش دیگر استفاده هم‌زمان از دو یا چند رنگدانه به پهنای طیفی متفاوت است تا پهنای طیفی بزرگ‌تری مورد استفاده سلول قرار بگیرد. با استفاده هم‌زمان از دو نوع رنگدانه‌ی D131 و رنگدانه‌ی سیاه، Black dye، نه تنها در نواحی که دو رنگدانه جذب دارند، بلکه در ناحیه‌ای که تنها Black Dye نیز جذب دارد، بهبود در میزان بازده کوانتومی خارجی مشاهده می‌شود.

۵-۲- استفاده از نقاط کوانتومی به عنوان حساس‌کننده

نقاط کوانتومی مانند CdS، CdSe، PbS، CdTe با اندازه‌های ۲-۳ نانومتر که شکاف انرژی بزرگی دارند، به عنوان حساس‌کننده در سلول‌های

در سلول‌های خورشیدی، فقط ۶۰٪ نور خورشید در این نوع سلول خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳] که یکی از رهیافت‌ها برای استفاده کارآمد از نور فرودی، استفاده از لایه پراکننده است (شکل ۱). این لایه متشکل از ذره‌های بزرگ‌تر ۳۰۰ نانومتری است که با پراکندگی نور، مانع از خروج نور از لایه فعال تیتانیم دی‌اکسید می‌شود و با برگرداندن نور به این لایه شفاف، طول مسیر نور و در نتیجه جذب فوتون‌ها به وسیله رنگدانه را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود مقدار فوتوجریان می‌شود. از طرفی اندازه بزرگ این ذره‌های پراکنده نور، منجر می‌شود که سطح مؤثر کمی برای جذب رنگدانه داشته باشند. میان مقدار ذره‌های کوچک که سطح مؤثر بالایی دارند و مقدار ذره‌های بزرگ که پراکنده‌های مؤثر نور محسوب می‌شوند، بایستی توازن برقرار باشد تا بازده سلول خورشیدی به طور مؤثر افزایش یابد و ضخامت لایه نایبستی بیش از ۱۵-۱۰ میکرومتر شود زیرا در کنار افزایش مقاومت سری در سلول خورشیدی، مسیر حرکت الکترون در لایه و مسیر حرکت یون‌ها در داخل الکترولیت افزایش می‌یابد [۲۳] که اثر نامطلوبی بر کارکرد سلول می‌گذارد.

نیز ویژگی‌های نوری ذره‌های تیتانیم دی‌اکسید بدون رنگدانه و پوشش داده شده با رنگدانه؛ در داخل الکترولیت را محاسبه کرده است که جذب ذاتی ذره‌ها با پوشش تک‌لایه‌ای از رنگدانه افزایش می‌یابد. این محاسبات نشان می‌دهد که با داشتن ذره‌های ۱۲ نانومتری، به دلیل افزایش سطح مؤثر و افزایش میزان رنگدانه جذب شده روی سطح تیتانیم دی‌اکسید، میزان ضریب جذب مؤثر افزایش می‌یابد و ذره‌های ۲۵۰ نانومتری، بهترین ضریب پراکندگی مؤثر را ایجاد می‌کنند [۲۰]. اندازه [۲۱]، ضریب شکست [۲۲] و موقعیت ذره‌های پراکنده نسبت به یکدیگر نیز بر میزان پراکندگی مؤثر است. الکترود نوری حاوی نانوذره‌های ۲۵ نانومتری تیتانیم دی‌اکسید است که این نانوذره‌ها، باعث افزایش سطح مؤثر به اندازه ۱۰۰۰ برابر، نسبت به سطح هندسی الکترود می‌شوند. چنین سطح زیادی با یک تک لایه از رنگدانه پوشیده می‌شود و بنابراین سلول خورشیدی جذب نور قابل قبولی دارد. از آن جایی که لایه حاوی ذره‌های ۲۵ نانومتری شفاف اند، بخشی از نور، بدون جذب به وسیله رنگدانه از لایه عبور می‌کند که این نور جذب نشده در تولید الکترون نقشی ندارد. با توجه به محدوده جذب رنگدانه‌های استفاده شده



شکل ۱ (بالا) سلول خورشیدی ساخته شده با لایه شفاف که فقط حاوی نانوذره‌های ۲۵ نانومتری تیتانیم دی‌اکسید است و (پایین) سلول خورشیدی ساخته شده با لایه‌های شفاف و پراکنده و نمایش برگشت نور به لایه شفاف با استفاده از لایه پراکنده.

حاوی ذره‌های بزرگی است که خود از ذره‌های نانومتری که سطح مؤثر بالایی برای جذب بیش تر رنگدانه دارند، تشکیل شده است. بنابراین، این نانوذره‌ها به صورت کلوخه‌ای به یکدیگر متصل شده‌اند و ذره‌های بزرگ‌تر را تشکیل داده‌اند که ذره‌های بزرگ‌تر، باعث پراکندگی نور می‌شوند و ذره‌های سازندهی آنها به مقدار قابل ملاحظه‌ای رنگدانه را جذب می‌کنند (شکل ۲) [۲۵]. [۲۶]. این ساختارها، میکروانه نیز نامیده می‌شوند. پراکندگی نور ناشی از تحریک نوری چندقطبی‌های درون ذره است که در ساده‌ترین حالت، می‌توان فقط پراکندگی ناشی از دوقطبی تشکیل شده را در نظر گرفت. اگر دو دوقطبی به اندازه‌ی نصف طول‌موج از یکدیگر فاصله داشته باشند، یکدیگر را خنثی می‌کنند. حال اگر محیط چگالیده باشد احتمال یافتن یک دوقطبی نزدیک دوقطبی دیگر که پراکندگی یکدیگر را خنثی کنند، بیش‌تر است. بنابراین، پراکندگی در محیط چگال کاهش می‌یابد. کلوخه شدن ذره‌ها، احتمال یافتن دوقطبی نزدیک به دوقطبی مورد نظر را کاهش می‌دهد و بازده

۷-۲- مدیریت نور با استفاده از حفره‌های کروی ۴۰۰ نانومتری در بستر لایه فعال

در این رهیافت، نانوذره‌هایی مانند نانوذره‌های ۴۰۰ نانومتری پلی استایرن با خمیر متداول تیتانیم دی‌اکسید ترکیب می‌شود که در حین عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰°C، این ذره‌های پلیمری حذف می‌شوند و حفره‌هایی را در ساختار لایه فعال به جای می‌گذارند که منجر به بهبود ۲۵ درصدی در عملکرد سلول خورشیدی شده است [۲۴]. در کنار اثرهای نوری، این ساختار برای سلول‌های که الکترولیت آن‌ها و شکسانی بالایی دارد، نیز مناسب است.

۸-۲- مدیریت نور با استفاده از لایه‌های جذب‌کننده و پراکنده نور به طور هم‌زمان

از دیگر رهیافت‌ها برای افزایش جذب نور، استفاده از لایه‌ای است که به طور هم‌زمان جذب‌کننده و پراکنده‌ی نور باشد. در این ساختار، لایه پراکنده

فوتونی قرار دارند، اجازه‌ی انتشار در هیچ جهتی در داخل ماده را ندارند. از طول‌موج‌های بلندتر به سمت نور توقف، در لایه‌ی قرمز نور به صورت امواج ایستا است که در داخل بخشی (ماده‌ای) از بلور فوتونی با ضریب شکست بیشتر محبوس می‌شود و این محبوس شدن نور و ایستا شدن امواج نور برای لایه‌ی آبی طیف، در ماده با ضریب شکست پایین‌تر در بلور فوتونی صورت می‌گیرد. بنابراین، رنگدانه که در بخش با ضریب شکست بالاتر دارد، قرار دارد با طول‌موج‌های قرمز، بیشتر برهم‌کنش دارد. بنابراین، با استفاده از بلورهای فوتونی و کند کردن حرکت نور و محبوس شدن نور در بخش با ضریب شکست بالاتر که تیتانیم دی‌اکسید حساس شده به رنگدانه است، پاسخ سلول خورشیدی در دریافت نور قرمز که اغلب رنگدانه‌ها جذب مناسبی در این محدوده ندارند، بهبود می‌یابد و افزایش در فوتوجریان مشاهده می‌شود [۲۷]–[۳۰].

۲-۱۰- مدیریت نور با استفاده از تشدید پلاسمون سطحی نانو ساختار-

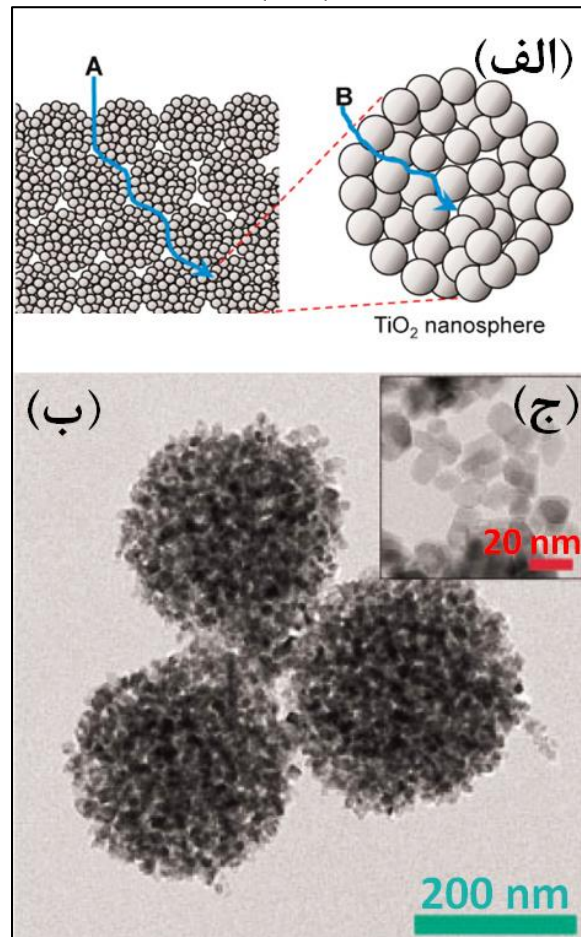
های فلزی

چنانچه نور فرودی بر نانو ساختارهای فلزی مانند نقره و طلا، فرکانسی برابر با فرکانس تشدید پلاسمون‌های سطحی فلز داشته باشد، میدان الکترومغناطیسی بهبود یافته‌ای پیرامون فلز ایجاد می‌شود. استفاده از نانو ساختارهای فلزی در سلول‌های خورشیدی منجر می‌شود که مولکول رنگدانه با قرار گرفتن در میدان نزدیک آن‌ها، چگالی انرژی (نور) بیشتری را دریافت کند که در بهبود عملکرد سلول مؤثر است. با توجه به این که فلزهایی مانند نقره و طلا که تشدید پلاسمون سطحی فعال در منطقه مرئی دارند، در الکترولیت ناپایدارند و از آن جایی که چنانچه رنگدانه در تماس مستقیم با فلز باشد، عملکرد رنگدانه در سلول خورشیدی با تزریق الکترون از فلز (که دریایی از الکترون است) به آن مختل می‌شود، سطح فلز با اکسیدهای نیمه‌رسانا مانند تیتانیم دی‌اکسید و یا سیلیکا پوشش داده می‌شود. بهینه ضخامت لایه‌ی تیتانیم دی‌اکسید به طول نفوذ الکترون در لایه‌ی تیتانیم دی‌اکسید و عمق نفوذ نور در این لایه بستگی دارد [۱۰]، [۱۳۸]. ضخامت لایه‌ی تیتانیم دی‌اکسید بایستی به اندازه کافی زیاد باشد تا تمام فوتون‌های فرودی را جذب کند و در عین حال ضخامت این لایه باید به اندازه کافی کوچک باشد تا به دلیل کاهش مساحت سطحی در تماس با الکترولیت، میزان باز ترکیب الکترون تزریق شده به تیتانیم دی‌اکسید با الکترولیت کاهش یابد، و الکترون انتقال یافته به تیتانیم دی‌اکسید به طور مؤثر جمع‌آوری و به مدار خارجی هدایت شود. با کاهش ضخامت لایه‌ی تیتانیم دی‌اکسید، میزان رنگدانه مصرفی که از اجزای گران قیمت در ساخت سلول‌های خورشیدی است، کاهش می‌یابد. پلاسمون‌های سطحی، نوسان‌های الکترومغناطیسی مقید الکترون‌ها در فصل مشترک میان فلز و دی‌الکتریک است و با توجه به قابلیت هدایت و محدود کردن نور در یک حجم کوچک و یا پراکندگی نور مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۳۹]–[۱۴۱] و میزان جذب نور را تقویت می‌کنند. اثر بهبود دهنده‌ی پلاسمونیک، نه تنها در سلول‌هایی که بازده کمی دارند که در سلول‌های با بازدهی بالا نیز قابل مشاهده است [۱۱۸]، [۱۱۹]، [۱۴۲] که با افزایش ۲۵ درصدی در بازده، این کمیت را به ۸/۹٪ ارتقا داده است.

۲-۱۱- مدیریت نور با استفاده از مواد نورتاپ

از عوامل محدود کننده در بازدهی سلول‌های خورشیدی، حساسیت به تمام طیف خورشید است. اگر چه توزیع طیفی نور خورشیدی در AM۱/۵ شامل فوتون‌هایی است که از محدوده فرابنفش با طول‌موج ۲۸۰ nm تا زیرقرمز با طول‌موج ۲۵۰۰ nm را پوشش می‌دهند، سلول‌های خورشیدی تنها از بخش

پراکندگی از ذره‌های کلوخه شده افزایش می‌یابد. همان طور که گفته شد نانوذره‌های تیتانیم دی‌اکسید در پراکندگی نور اثری ندارند و پراکندگی نور از ذره‌های بزرگ‌تر رخ می‌دهد. از آنجایی که رنگدانه‌ها معمولاً در طول موج‌های بلندتر جذب قابل ملاحظه‌ای ندارند، بدین ترتیب پراکندگی نور در طول‌موج‌های بلندتر، منجر به بهبود عملکرد سلول خورشیدی می‌شود [۱۹].



شکل ۲ (الف) طرحواره لایه‌ی پراکننده حاوی ذره‌های بزرگ که با کلوخه شدن ذره‌های کوچک‌تر ساخته شده‌اند. تصویرهای میکروسکوپ الکترونی (ب) ذره‌های پراکننده و (ج) ذره‌های سازنده آن‌ها [۲۵].

ساختار دیگری که در این رهیافت استفاده می‌شود، کره‌های توخالی متشکل از نانوذره‌های تیتانیم دی‌اکسید است که در این ساختار نیز، جذب و پراکندگی نور هم‌زمان انجام می‌شود و با دریافت بیشتر نور، بهبود در فوتوجریان مشاهده می‌شود.

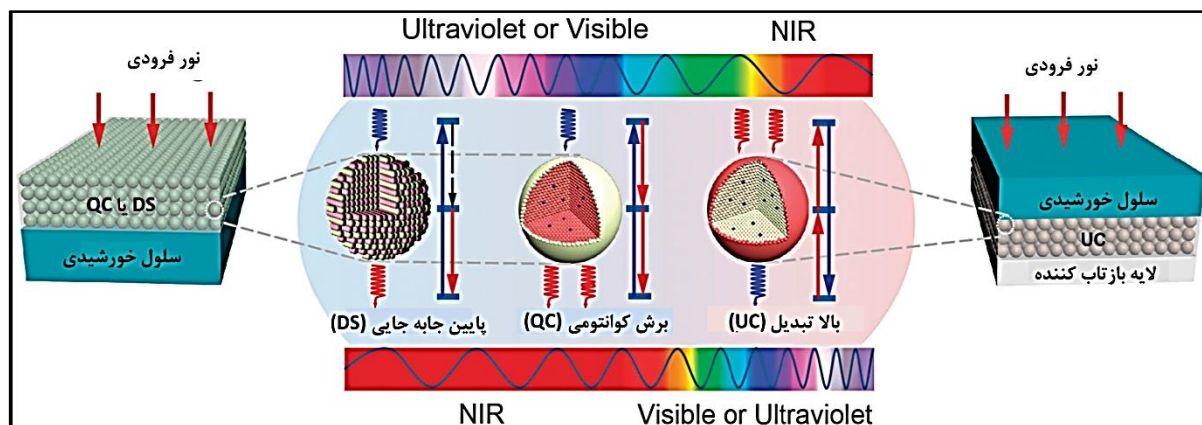
بازتاب بخشی لایه‌های شفاف تیتانیم دی‌اکسید و لایه‌های حاوی کره‌های توخالی تیتانیم دی‌اکسید نشان می‌دهد که بازتاب نور از لایه‌ی شامل کره‌های توخالی نسبت به لایه‌ی شفاف افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد.

۲-۹- مدیریت نور با استفاده از بلورهای فوتونی

سرعت نور در مواد گوناگون بین ۱۰۸ تا ۳×۱۰۸ متر بر ثانیه است. بنابراین، نور برای عبور از یک لایه‌ی ۱۰ میکرومتری، ۱۰۰ فمتوثانیه زمان نیاز دارد. با استفاده از پراکندگی براگ می‌توان نور را محبوس کرد که به این ترتیب سرعت نور کاهش می‌یابد. ساختارهای سه بعدی بلورهای فوتونی دارای نوارهای توقف هستند که نور با طول‌موج‌های مشخص که در داخل شکاف نوار

پر انرژی، واهلش‌های غیرتابشی که به دنبال آن واهلش تابشی داریم؛ رخ می‌دهد که منجر می‌شود تا گسیل فوتونی با انرژی کمتر داشته باشیم. دو فرایند برش کوانتومی و پایین جا به جایی سبب می‌شوند که تا از بخش انرژی های پرانرژی طیف خورشید اما با بازده کوانتومی متفاوت به طور موثر استفاده کنیم. بازده کوانتومی تئوری برای فرایند پایین جا به جایی همیشه کمتر از ۱۰۰٪ است در حالی که برای فرایند برش کوانتومی به ۱۰۰٪ می‌رسد. مواد مناسب برش کوانتومی و پایین جا به جایی معمولاً در سطح جلولی سلول تک قرار می‌گیرند تا فوتونی که به فوتون با انرژی کمتر تبدیل شده است به وسیله سلول جذب شود. مواد مناسب برای فرایند بالا تبدیل نیز معمولاً بین سلول خورشیدی دو وجهی و لایه بازتاب کننده نور قرار می‌گیرد تا کم تر از شکاف نواری طیف خورشید را جمع‌آوری کنند. از آن جایی که یون‌های سه ظرفیتی لانتانید، غنی از ساختار سطوح انرژی (که مشهور به دیاکرام (Dieke) است؛ از انتخاب‌های اولیه برای تبدیل طیف خورشید محسوب می‌شوند که مدیریت فوتون را تسهیل می‌کنند.

نسبتاً کوچکی از فوتون‌های خورشید استفاده می‌کنند چون هر ماده فوتولتائیکی به پهنای باریکی از فوتون‌های خورشیدی که با شکاف نواری ماده مطابقت دارد، پاسخ می‌دهد. در اصل فوتون‌های با انرژی بیش از انرژی شکاف نواری جذب می‌شوند که انرژی بیش تر به طور موثر استفاده نمی‌شود و به صورت حرارت رها می‌شود. ائتلاف تبدیل گرمایی انرژی فوتون‌ها به همراه انرژی فوتون‌های جذب نشده در سلول‌های خورشیدی تقریباً ۵۰٪ انرژی نور خورشید را شامل می‌شوند. با استفاده از لایه‌ای شامل مواد نورتاب به عنوان مبدل‌های طیفی می‌توان این ائتلاف را کاهش داد. سه نوع فرایند نورتاب شامل بالا تبدیل (up-conversion)، برش کوانتومی (quantum cutting) و پایین جا به جایی (down-shifting) وجود دارد که برای افزایش بازده ادوات فوتولتائیک به کار گرفته می‌شود (شکل ۳). در فرایند بالا تبدیل، دو یا تعداد بیش تری فوتون فرودی کم انرژی به تک فوتون با انرژی بالاتر تبدیل می‌شود. در فرایند برش کوانتومی، برای یک فوتون پر انرژی، واهلش تابشی دو مرحله‌ای اتفاق می‌افتد که منجر می‌شود دو یا تعداد بیش‌تری فوتون کم انرژی گسیل شود. در فرایند پایین جا به جایی، با تابش یک فوتون



شکل ۳) شماتیک تبدیل طیفی در کاربردهای فوتولتائیک

۳- جمع‌بندی

رهیافت‌های گوناگونی برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی وجود دارد که شامل بهبود تزریق الکترون، ترابرد و انتقال الکترون، جمع‌آوری حامل‌های بار و همچنین مدیریت نور یا استفاده مناسب از نور است که شامل مهندسی و طراحی رنگدانه‌های جدید با مقدار جذب بالاتر و یا پهنای جذب گسترده‌تر است. استفاده از نقطه‌های کوانتومی، لایه‌های گوناگون پراگنده نور، بلورهای فوتونی، بهره گرفتن از تشدید پلاسمون سطحی فلز و همچنین مواد نورتاب است.

۴- منابع

4. S. E. Koops, B. C. O'Regan, P. R. F. Barnes, and J. R. Durrant, "Parameters influencing the efficiency of electron injection in dye-sensitized solar cells," J. Am. Chem. Soc., vol. 131, no. 13, pp. 4808-18, Apr. 2009.
5. M. Grätzel, "Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells," J. Photochem. Photobiol. A Chem., vol. 164, no. 1-3, pp. 3-14, Jun. 2004.
6. M. K. Nazeeruddin, F. D. Angelis, S. Fantacci, A. Selloni, G. Viscardi, P. Liska, S. Ito, B. Takeru, and M. Graetzel, "No Title," J. Am. Chem. Soc., vol. 127, p. 16837, 2005.
7. Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide, and L. Han, "Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1%," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, no. No. 25, pp. L638-L640, Jun. 2006.
8. L. G. C. Rego and V. S. Batista, "Quantum dynamics simulations of interfacial electron transfer in sensitized TiO₂ semiconductors," J. Am. Chem. Soc., vol. 125, pp. 7989-7997, 2003.
9. M. Grätzel, "Recent advances in sensitized mesoscopic solar cells," Acc. Chem. Res., vol. 42, no. 11, pp. 1788-98, Nov. 2009.

1. M. Graetzel, "Photoelectrochemical cells," Nature, vol. 414, pp. 338-344, 2001.
2. F. Hallermann, C. Rockstuhl, S. Fahr, G. Seifert, S. Wackerow, H. Graener, G. Plessen, and F. Lederer, "pss solidi," phys. stat. sol., vol. 205, pp. 2844-2861, 2008.
3. M. O'Regan, B. & Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films," Nature, vol. 353, pp. 737-740, 1991.



11. S. M. Zakeeruddin, M. K. Nazeeruddin, R. Humphry-Baker, P. Pechy, P. Quagliotto, C. Barolo, G. Viscardi, and M. Grätzel, "No Title," *Langmuir*, vol. 18, p. 952, 2002.
12. S. Ito, H. Miura, S. Uchida, M. Takata, K. Sumioka, P. Liska, P. Comte, P. Pechy, and M. Gratzel, "No Title," *Chem. Commun.*, pp. 5194-5196, 2008.
13. J. M. Szeifert, D. Fattakhova-rohlfing, D. Georgiadou, V. Kalousek, J. Rathouský, D. Kuang, S. Wenger, S. M. Zakeeruddin, M. Gra, and T. Bein, " ' Brick and Mortar ' Strategy for the Formation of Highly Crystalline Mesoporous Titania Films from Nanocrystalline Building Blocks," *Chem. Mater.*, vol. 21, no. 7, pp. 1260-1265, 2009.
14. G. Hodes, A. Albu-Yaron, F. Decker, and P. Motisuke, "No Title," *Phys. Rev. B*, vol. 36, pp. 4215-4221, 1987.
15. S. Gimenez, I. Mora-Sero, L. Macor, N. Guijarro, T. Lana-Villarreal, R. Gomez, L. Diguna, J. Shen, Q. T. Toyoda, and J. Bisquert, "No Title," *Nanotechnology*, vol. 20, p. 295204, 2009.
16. Y. L. Lee and Y. S. Lo, "No Title," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, pp. 604- 609, 2009.
17. I. Mora-Sero and J. Bisquert, "Breakthroughs in the Development of Semiconductor-Sensitized Solar Cells," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 1, pp. 3046-3052, 2010.
18. J. B. Sambur, T. Novet, and B. A. Parkinson, "Multiple Exciton Collection in a Sensitized Photovoltaic System," *Science* (80-.), vol. 330, pp. 63-66, 2010.
19. A. Usami, "Theoretical simulations of optical con " nement in dye-sensitized nanocrystalline solar cells," *Sol. Energy Mater.*, vol. 64, pp. 2-11, 2000.
20. W. E. Vargas and G. A. Niklasson, "Optical properties of nano-structured dye-sensitized solar cells," *Sol. Energy Mater.*, vol. 69, pp. 147-163, 2001.
21. W. E. Vargas, "Optimization of the diffuse reflectance of pigmented coatings taking into account multiple scattering," *J. Appl. Phys.*, vol. 88, no. 7, p. 4079, 2000.
22. S. Hore, C. Vetter, R. Kern, H. Smit, and A. Hinsch, "Influence of scattering layers on efficiency of dye-sensitized solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 9, pp. 1176-1188, May 2006.
23. J. Ferber and J. Luther, "Computer simulations of light scattering and absorption in dye-sensitized solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 54, pp. 265-275., 1998.
24. S. Hore, P. Nitz, C. Vetter, C. Prahl, and R. Kern, "Scattering spherical voids in nanocrystalline TiO 2 - enhancement of efficiency in dye-sensitized solar cells," *Society*, pp. 2011-2013, 2013.
25. Y. J. Kim, M. H. Lee, H. J. Kim, G. Lim, Y. S. Choi, N. Park, K. Kim, and W. I. Lee, "Formation of Highly Efficient Dye-Sensitized Solar Cells by Hierarchical Pore Generation with Nanoporous TiO 2 Spheres," *Adv. Mater.*, vol. 21, no. 36, pp. 3668-3673, Sep. 2009.
26. Q. Zhang, T. P. Chou, B. Russo, S. a. Jenekhe, and G. Cao, "Polydisperse Aggregates of ZnO Nanocrystallites: A Method for Energy-Conversion-Efficiency Enhancement in Dye-Sensitized Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 18, no. 11, pp. 1654-1660, Jun. 2008.
27. S. Nishimura, N. Abrams, B. a Lewis, L. I. Halaoui, T. E. Mallouk, K. D. Benkstein, J. van de Lagemaat, and A. J. Frank, "Standing wave enhancement of red absorbance and photocurrent in dye-sensitized titanium dioxide photoelectrodes coupled to photonic crystals.," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 125, no. 20, pp. 6306-10, May 2003.
28. L. Ha, M. Ocan, B. S. Colodrero, G. Boschloo, and A. Hagfeldt, "Porous One-Dimensional Photonic Crystals Improve the Power-Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells," *Adv. Mater.*, vol. 21, pp. 764-770, 2009.
29. A. Mihi, M. E. Calvo, J. A. Anta, H. Miguez, A. Mihi, M. E. Calvo, J. A. Anta, and H. Mı, "Spectral Response of Opal-Based Dye-Sensitized Solar Cells Spectral Response of Opal-Based Dye-Sensitized Solar Cells," vol. 112, pp. 13-17, 2008.
30. L. I. Halaoui, N. M. Abrams, and T. E. Mallouk, "Increasing the conversion efficiency of dye-sensitized TiO2 photoelectrochemical cells by coupling to photonic crystals.," *J. Phys. Chem. B*, vol. 109, no. 13, pp. 6334-42, Apr. 2005.