

مروری بر انواع سلول‌های خورشیدی

طیبه احمدپور^۱، حبیب مهری‌زاده^۲، علیقلی نیائی^{۳*}، داریوش سالاری^۱

۱- دانشجوی دکتری شیمی کاربردی، دانشگاه تبریز

۲- استادیار شیمی کاربردی، دانشگاه ارومیه

۳- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

۴- استاد شیمی کاربردی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۸/۱۴

پیام‌نگار: niaei@yahoo.com

چکیده

امروزه فناوری‌های متنوع سلول‌های خورشیدی با هدف بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر پرتوهای خورشید توسعه یافته است. سلول‌های خورشیدی بر پایه سیلیکون، اولین نسل سلول‌های خورشیدی‌اند که بر روی پولک‌های سیلیسیمی ساخته شدند که عمدتاً به صورت بلورهای منفرد بودند. توسعه بیشتر در فناوری سلول‌های خورشیدی از قبیل فیلم‌های نازک، سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگ و سلول‌های خورشیدی آلی، به افزایش بازده سلولی انجامیدند. مانع عمده پیشرفت سلول‌های خورشیدی بها و بازده آنهاست. به منظور انتخاب درست سلول خورشیدی برای یک موقعیت جغرافیایی خاص، درک سازوکارها و فناوری‌های مختلف خورشیدی ضروری است. در این مقاله مروری، توسعه تدریجی در زمینه فناوری سلول‌های خورشیدی بررسی و مقایسه خواهد شد. در ادامه، روش‌های مختلفی که موجب بهبود و افزایش بازده فناوری بهره‌برداری از انرژی خورشیدی می‌شود، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

کلیدواژه‌ها: سلول‌های خورشیدی، نیم‌رساناها، فوتوولتائیک، انرژی الکتریکی، انرژی تجدیدپذیر.

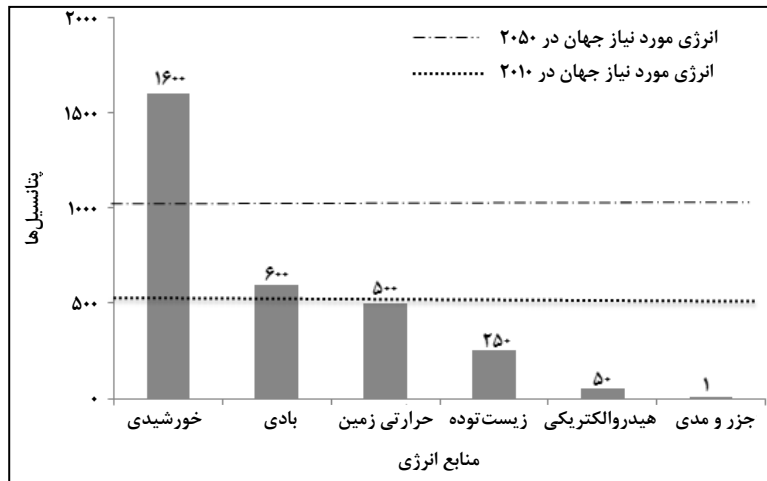
۱. مقدمه

منظور این است که انرژی دریافتی در زمین از خورشید، در طول یک روز می‌تواند تمامی نیازهای جهان را برای بیش‌تر از ۲۰ سال تامین کند. در شکل (۱) ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر را براساس فناوری‌های امروزه مشاهده می‌کنید. پیشرفت‌های اخیر فناوری، به افزایش ظرفیت برای هرکدام از منابع منجر خواهد شد. با این حال، انتظار می‌رود نیاز جهانی به انرژی، سالیانه روند افزایش ۵ درصدی را حفظ کند. انرژی خورشیدی تنها گزینه‌ای است که می‌تواند چنین نیاز بزرگ و رو به افزایشی را تأمین کند [۱].

آفتاب (نور خورشید) یکی از فراوان‌ترین منابع انرژی موجود بر روی زمین به‌شمار می‌آید. منشأ تمام انرژی‌های بادی، سوخت‌های فسیلی^۱ و زیست‌توده^۲ نور خورشید است. انرژی خورشیدی با سرعت ۱۲۰ پتا وات^۳ (۱ پتا وات = 10^{15} وات) بر روی سطح زمین می‌تابد.

* تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

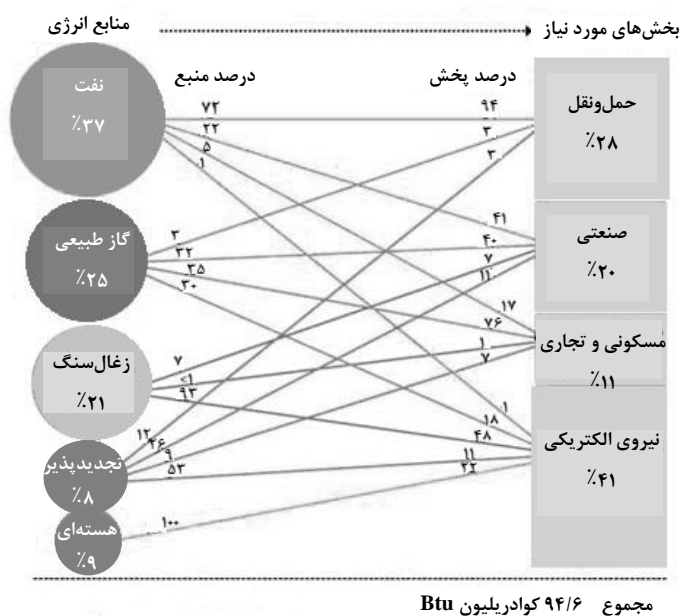
1. Fossil Fuel
2. Biomass
3. Petawatt



شکل ۱. ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر (بر پایه سطح فناوری‌های امروزی) [۲].

اژانس بین‌المللی انرژی^۱ (IEA)، در حدود ۳۰ درصد کل انرژی تولید شده، به وسیله بخش‌های تولید برق با بازده ۴۲/۶٪ مصرف می‌شود [۱]. در شکل (۲) منابع مختلف انرژی و بخش‌های مورد نیاز را در ایالات متحده آمریکا مشاهده می‌کنید. مطابق این شکل، در کشورهای توسعه یافته‌ای چون ایالات متحده آمریکا، مصرف انرژی به منظور تولید برق حتی دارای درصد بیشتری (۴۱٪) نیز هست [۳].

کاربردهای انرژی خورشیدی متنوع است که به عنوان مثال می‌توان به تولید برق، فرایندهای فوتوشیمیایی، نیروی محرکه خورشیدی، نمک‌زدایی خورشیدی و کنترل دمای اتاق اشاره کرد. جمع‌آوری انرژی خورشیدی و تبدیل آن به انرژی برق از اهمیت فراوانی برخوردار است، لذا این روش مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. با توجه به تعادل انرژی در سال ۲۰۱۰ و گزارش ارائه شده



شکل ۲. منابع تأمین انرژی و بخش‌های مورد نیاز در ایالات متحده آمریکا [۳].

1. International Energy Agency

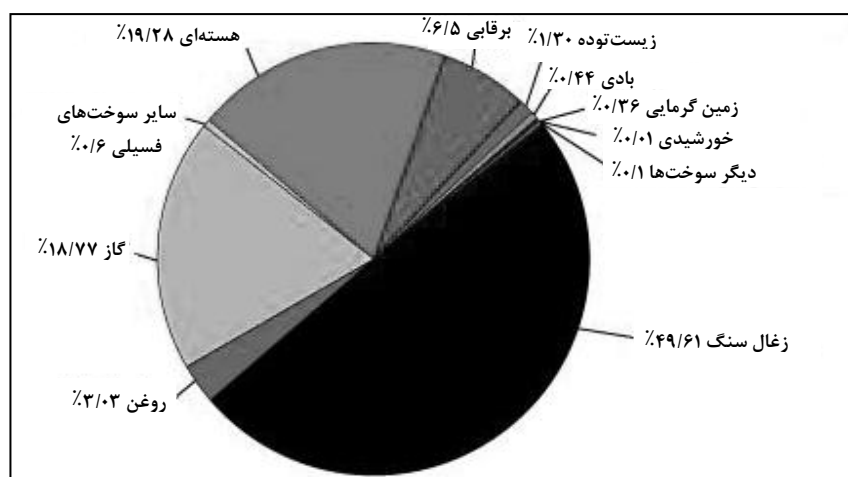
انرژی رشد شتابان و پیوسته‌ای در آینده انتظار می‌رود، به گونه‌ای که بزرگترین سهم انرژی در ترکیب انرژی جهان توسط انرژی خورشیدی تامین شود [۱].

۲. مزایای ذخیره انرژی خورشیدی

از آنجا که نور خورشید همیشه در دسترس نیست، بنابراین سلول‌های خورشیدی فوتوولتائیک^۳ (PV) ممکن است در طول شب کار نکنند و در این صورت مقدار زیادی برق بی‌استفاده می‌ماند [۱]. بنابراین، ذخیره انرژی عامل مهمی در زمینه سلول‌های خورشیدی به‌شمار می‌آید. ابزارهای ذخیره انرژی متفاوتی در بازار یافت می‌شوند اما بسیار گران‌اند و طول عمر کوتاهی دارند. در سال ۲۰۱۴، پژوهشگران دانشگاه هاروارد نوع جدیدی از باتری‌های دارای مولکول‌های آلی به نام کوئینون^۴ را عرضه کردند. این نوع باتری‌ها در نیروگاه‌ها یافت می‌شوند و مقرون به‌صرفه‌اند و می‌توانند انرژی نور خورشید را برای چندین روز ذخیره کنند [۷]. نخستین ابزار ذخیره انرژی سلول خورشیدی جهان توسط وئو و همکارانش در دانشگاه ایالتی اوهایو^۵ معرفی شد. این وسیله نه تنها می‌تواند انرژی را ذخیره کند بلکه می‌تواند با تکیه بر باتری جدید لیتیم-اکسیژن مورد استفاده در نور خورشید، منجر به کاهش ۲۵٪ هزینه‌های انرژی تجدیدپذیر شود [۸].

انرژی خورشیدی پاک و تجدیدپذیر است و آلاینده‌ای را وارد محیط زیست نمی‌کند [۱]. عمده‌ترین مزیت انرژی خورشیدی بر دیگر مولدهای تولید برق از این قرار است که در این روش، نور خورشید می‌تواند مستقیماً توسط سلول‌های خورشیدی فوتوولتایی کوچک به شکل انرژی خورشیدی گردآوری شود [۴ و ۵]. از دیگر مزایای انرژی خورشیدی می‌توان به رایگان بودن آن اشاره کرد. همچنین فناوری‌های مبتنی بر پایه انرژی خورشیدی دارای هزینه‌های نیروی انسانی کمتری نسبت به فناوری‌های مرسوم تولید انرژی‌اند [۶-۴ و ۱]. اگرچه انرژی خورشیدی در همه‌جا رایگان در دسترس است، با این حال هنوز هم با توسعه سلول‌های خورشیدی، صفحات^۱ و واحدها^۲ نیازمند صرف هزینه اولیه روی تجهیزات به کار گرفته شده برای برداشت انرژی تابشی‌اند. امروزه، به دلیل کاهش مقدار منابع انرژی تجدیدپذیر، هزینه مصرفی به ازای هر وات مصرفی در دستگاه‌های انرژی خورشیدی خیلی پراهمیت‌تر شده است و این امر قطعاً در سال‌های آینده از لحاظ اقتصادی بیشتر مورد توجه است و از نظر قیمت و کاربرد جزء بهترین فناوری‌ها محسوب خواهد شد [۷].

مطابق شکل (۳)، اگرچه انرژی خورشیدی درصد کمی (در حدود ۱٪) از ترکیب انرژی موجود در جهان را به خود اختصاص می‌دهد، ولی کشورهای پیشرفته‌ای چون ایالات متحده آمریکا سهم بیشتری را در استفاده از انرژی خورشیدی دارد [۱]. با این حال برای این



شکل ۳. سهم بازار جهانی از انرژی خورشیدی در زمان کنونی [۱].

1. Panels
4. Quinone

2. Modules
5. Ohio

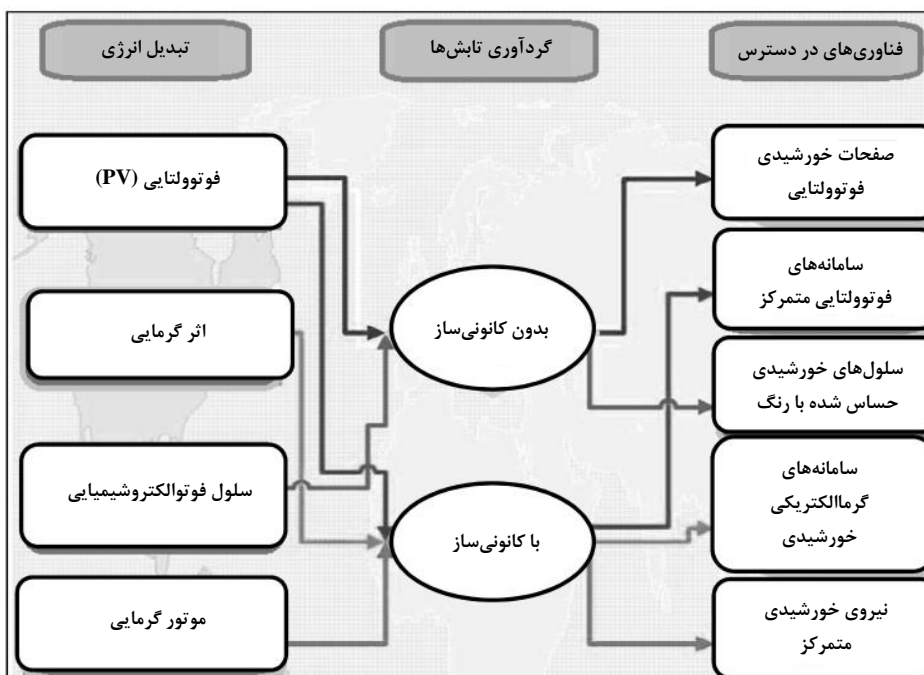
3. Photovoltaic Solar Cell

۳. فناوری‌های مبتنی بر نور خورشید

انواع گوناگون از فناوری‌های مبتنی بر نور خورشید یافت می‌شوند که در شکل (۴) مشاهده می‌کنید. هر کدام از این فناوری‌ها از لحاظ عملکرد، تقریباً متفاوت است و هر کدام دارای مزایای منحصر به فردی است. بررسی و مقایسه بین فناوری‌های مختلف به ما کمک خواهد کرد تا فناوری پرسودتر و با کارایی بالاتر را در شرایط خاص موجود مشخص کنیم [۱].

مقایسه بین انواع فناوری‌های مبتنی بر نور خورشید در جدول (۱) درج شده است. به طور کلی، صفحات خورشیدی فوتولتایی (PV)

نامتمرکز^۱ و انرژی خورشیدی متمرکز^۲ (CSP) از جمله دو فناوری کامل محسوب می‌شوند. این دو فناوری تجاری‌سازی شده و انتظار می‌رود در آینده به رشد شتابانی دست یابند [۱]. سامانه‌های گرماالکتریکی خورشیدی^۳ (STA)، سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ^۴ (DSSC) و سامانه‌های فوتولتایی متمرکز^۵ از جمله فناوری‌های نوظهور و تحت مطالعه‌اند. در نهایت، ممکن است در آینده در صورت دستیابی به پیشرفت‌های فنی لازم، که آنها را در مقابل تجاری شدن توانایی می‌بخشد، سهم چشمگیری از بازار انرژی خورشیدی را به خود اختصاص خواهند داد [۱].



شکل ۴. فناوری‌های مبتنی بر نور خورشید [۱].

جدول ۱. اساس فناوری‌های موجود بر پایه انرژی خورشیدی [۱].

فناوری بسیار رایج در بازار امروزه	صفحات خورشیدی فوتولتایی
بیشترین بازده به دست آمده در آزمایشگاه	سامانه‌های فوتولتایی متمرکز
فناوری‌های تقلیدی از سامانه‌های زنده ^۶ بر اساس مواد آلی ارزان	سلول خورشیدی حساس شده با رنگ
بر اساس به کارگیری مواد گرماالکتریکی	سامانه گرماالکتریکی خورشیدی
معمولاً بر اساس به کارگیری موتور گرمایی	نیروی خورشیدی متمرکز

1. Non-Concentrated Photovoltaic Solar panel
3. Solar Thermoelectricity System
5. Concentrated Photovoltaic System

2. Concentrated Solar Power
4. Dye Sensitized Solar Cell
6. Biomimetic

۴. شرایط اساسی برای تولید سوخت‌های خورشیدی

مواد باید دارای شرایط متعدد ترمودینامیکی و سینتیکی برای ایجاد سوخت‌های خورشیدی موثر با جذب نور، انتقال حامل‌های نوری تشکیل شده به سطح، و واکنش‌های ردوکس لایه‌ای باشند [۹].
 TiO_2 انتخاب مناسبی برای کارهای اولیه فوجوشیما و هوندا [۱۰] بود، چون پتانسیل نوارهای آن برای هر دو واکنش آزادسازی اکسیژن^۱ (OER) و واکنش آزادسازی هیدروژن^۲ (HER) با اختلاف پتانسیلی اندک مناسب است [۱۱]. تولید سوخت در بهترین حالت با میزان فوتون‌های جذب شده متناسب‌اند، چون فقط فوتون‌های با انرژی بیشتر از شکاف نوری می‌توانند جذب شوند و طیف خورشیدی نیز در محدوده نور مرئی متمرکز (کانونی) شده است، پس حداکثر سرعت تولید سوخت‌های فسیلی با افزایش شکاف باند کاهش می‌یابد [۱۲]. فوتون‌های جذب شده، زوج الکترون-حفره ایجاد می‌کنند. به منظور تولید سوخت‌ها حتماً باید راهی برای انتقال این حفره‌ها و الکترون‌ها به سطح وجود داشته باشد و روش به کار رفته باید در واکنش‌های مطلوب بیشتر از واکنش‌های بازترکیبی زوج الکترون-حفره سهیم باشد.
 در مواد فوتوکاتالیستی کلئیدی، هر دو حامل‌ها باید به پیوندگاه مایع-نیمرسانا برسند تا واکنش ردوکس تحقق یابد. در سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی^۳ (PEC)، حامل‌های اقلیتی باید به محل اتصال مایع برسند و اکثریت حامل‌ها باید به رشد مایه‌های رسانا برسند. حامل‌ها به علت گرادیان غلظتی از طریق نفوذ حرکت می‌کنند و به علت لایه بار فضایی رانده می‌شوند [۱۳].
 طول نفوذ از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$L_D = \sqrt{D\tau} \quad (1)$$

که در آن D ضریب نفوذ معادل با $\mu K_B T/q$ ، τ طول عمر حامل، μ تحرک، K_B ثابت بولتزمن و q بار الکترونی است. طول مدت گردآور از رابطه $L_e = L_D + W$ به دست می‌آید که W پهنای بار فضایی و مشخص کننده اندازه ظاهری است. بنابراین، مواد می‌توانند از تحرک زیادی برخوردار باشند و طول مدت برای انتقال بار دارای محدوده وسیعی است [۹].

به محض اینکه حامل‌ها به سطح می‌رسند، باید به سرعت وارد واکنش شوند. واکنش‌های سریع به ولتاژهای اضافی بزرگتر از 0.2 الکترون‌ولت نیاز دارند که شکاف نوار جاذب را پهن‌تر می‌کند و بنابراین جذب نور و تولید سوخت‌ها را کاهش می‌دهد. برای کاهش این اثر می‌توان از کاتالیست‌هایی استفاده کرد که سینتیک‌های ردوکس لایه‌ای را شتاب می‌بخشند [۹].

مواد باید در محدوده pH مربوطه از نظر شیمیایی پایدار بوده و در مقابل خوردگی نوری نیز مقاوم باشند. برای توسعه این مواد می‌توان از عناصر غیرسمی که به فراوانی یافت می‌شوند استفاده کرد. هیچ ماده بلوری به شکل توده‌ای از همه این شرایط برای تبدیل موثر نور خورشیدی به سوخت برخوردار نیست. اخیراً چن و همکارانش [۱۲]، روش مفیدی را برای تعیین ویژگی مواد و انتخاب آنها به منظور تولید هیدروژن در سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی تدوین کردند که هدف از این کار تسریع در توسعه استفاده از مواد گوناگون به این منظور است. با استفاده از راهبردهای گوناگون می‌توان بر کاستی‌ها و معایب موجود در مواد مورد بررسی غلبه کرد. زمانی که عمق نفوذ نوری خیلی بزرگتر از مدت زمان جمع‌آوری حامل‌ها باشد، نانو مواد را می‌توان به کار گرفت.

مواد دارای شکاف نوار بزرگ می‌توانند به وسیله کروموفور^۴‌هایی حساس شوند که نور مرئی را جذب می‌کنند. اگر موقعیت‌های نواری برای پتانسیل‌های ردوکس مناسب نباشند در این صورت ممکن است پتانسیل‌های اضافی یا نمودار چرخه الکترونی^۵ بکار برده شوند [۱۴]. با استفاده از یک نمودار چرخه الکترونی، فوتون‌های جدا شده اکی‌والان‌های اکسایش و کاهش را در مواد مختلف ایجاد می‌کنند و تعادل باری حفظ می‌شود.

۵. سلول‌های خورشیدی

اثر فوتولتایی را نخستین بار الکساندر ادموند بکرل در سال ۱۸۳۹ مشاهده کرد [۱۵]. سپس، در سال ۱۹۴۶ نخستین سلول خورشیدی مدرن را راسل اوهل [۱۵] ساخت. سلول‌های خورشیدی فوتولتایی در اوایل به صورت پولک‌های سیلیکونی نازک بودند که انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کردند. فناوری فوتولتایی جدید بر پایه تشکیل زوج الکترون-حفره در هر سلول ساخته شده از

4. Chromophore
 5. Z-scheme

1. Oxygen Evolution Reaction
 2. Hydrogen Evolution Reaction
 3. Photo Electro Chemical

- سلول‌های خورشیدی سیلیکونی منفرد/ تک بلوری
- سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بسیار/ چند بلوری

۱-۱-۵ سلول‌های خورشیدی سیلیکونی منفرد/ تک بلوری

سلول خورشیدی تک‌بلوری، همانطور که از اسمشان بر می‌آید، از تک‌بلورهای سیلیکونی به کمک فرایندی ایجاد می‌شوند که فرایند چوکراسکی^۱ نام دارد [۱۹-۱۷]. در طول فرایند تولید، بلورهای سیلیسیم از قالب‌هایی با اندازه بزرگتر بریده می‌شوند. این تک‌بلورهای بزرگی که ایجاد می‌شوند نیاز به پردازش^۲ دقیقی دارند، زیرا فرایند «بازتبلور»^۳ سلول گران‌تر است و خود شامل چندین فرایند است. بازده این نوع سلول‌های خورشیدی بین ۱۷٪ الی ۱۸٪ است [۷].

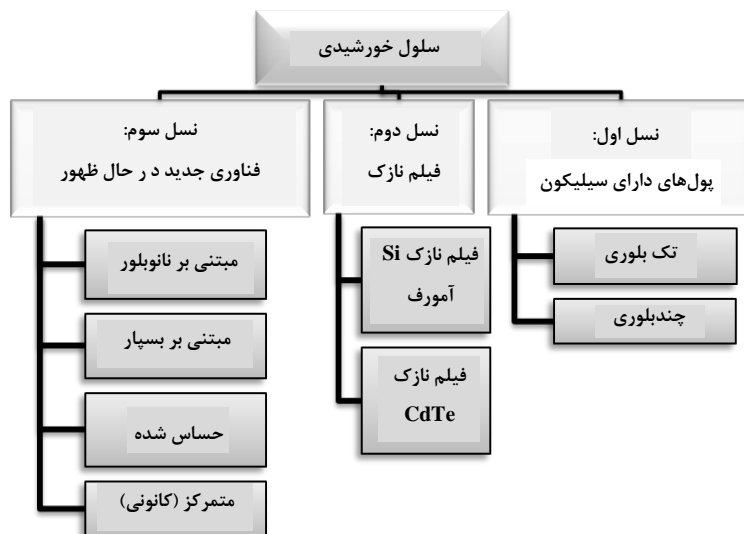
۲-۱-۵ سلول‌های خورشیدی سیلیکونی چندبلوری

واحدهای فوتو ولتائی چندبلوری عموماً ترکیبی از تعدادی بلورهای مختلف‌اند که در قالب یک تک‌سلول به همدیگر متصل شده‌اند. پردازش سلول‌های خورشیدی سیلیکونی چندبلوری بسیار مقرون به صرفه‌اند که با خنک کردن قالب‌گرافیتی پر شده از سیلیکون مذاب ایجاد می‌شوند. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی چندبلوری در حال حاضر معروف‌ترین نوع سلول‌های خورشیدی‌اند.

دو لایه مختلف (مواد نوع p و نوع n) از ماده نیم‌رساناست. در این آرایش ساختاری، زمانی که یک فوتون با انرژی کافی بر روی اتصال نوع p-n می‌تابد، الکترون‌ها با بدست آوردن انرژی لازم از فوتون تابشی، از یک لایه به لایه دیگر منتقل می‌شوند. نتیجه این اثر، ایجاد زوج الکترون-حفره‌هایی است که موجب ایجاد انرژی الکتریکی می‌شود. انواع مختلفی از مواد عمدتاً به شکل سیلیکون (سیلیکون بلور منفرد، چندبلوری، آمورف) [۴و۵]، کادمیم-تلورید [۴و۵]، مس-اینیدیم-گالیم-سلنید [۴و۵] و مس-اینیدیم-گالیم-سولفید [۱۶و۱۷] برای سلول‌های خورشیدی فوتوولتایی به کار رفتند. براساس نوع مواد، سلول‌های خورشیدی فوتوولتایی به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که در شکل (۵) مشاهده می‌کنید.

۱-۵ سلول‌های خورشیدی نسل اول: سوار شده بر پولکها

نسل اول سلول‌های خورشیدی، بر پولکهای سیلیکونی سوار شده است. این نوع سلول‌های خورشیدی به دلیل بازده بالا در تولید انرژی الکتریکی جزء قدیمی‌ترین و معروف‌ترین فناوری‌های سلول‌های خورشیدی‌اند. فناوری دارای پولک سیلیکونی به دو زیر گروه دسته بندی می‌شوند که عبارتند از [۱۶و۱۷و۴-۴]:



شکل ۵. انواع مختلف فناوری‌های سلول‌های خورشیدی [۷].

رنگ قهوه‌ای تیره‌اند، درحالی که در سمت انتقال به رنگ نقره‌ای‌اند [۷].

مشکل اصلی این نوع سلول‌های خورشیدی بازده‌های کم و تقریباً ناپایدار آنهاست. در حال حاضر، بازده‌های واحدهای فوتو ولتایی تجاری در محدوده ۴٪ الی ۸٪ تغییر می‌کند. این واحدها می‌توانند به آسانی در دماهای بالا عمل کنند و برای شرایط آب و هوایی متغیر، جایی که خورشید برای چند ساعت می‌تابد، مناسب‌اند [۷].

۲-۲-۵ سلول‌های خورشیدی فیلم نازک کادمیم تلورید

در میان سلول‌های خورشیدی فیلم نازک، کادمیم تلورید یکی از کاندیداهای اصلی برای توسعه ابزار فوتوولتایی ارزان‌تر از لحاظ اقتصادی، و نیز بادوام‌تر به‌شمار می‌آید و نخستین فناوری فوتوولتایی با هزینه کم نیز هست [۲۳ و ۲۴]. کادمیم تلورید دارای شکاف نواری در حدود ۱/۵ الکترون ولت و نیز ضریب جذب نوری و پایداری شیمیایی بالایی است. این خواص، کادمیم تلورید را به ماده منحصربفردی برای طراحی سلول‌های خورشیدی فیلم نازک تبدیل می‌کند.

کادمیم تلورید یک نیم‌رسانای با ترکیب بلوری و شکاف نوار مستقیم است که به موجب آن جذب نور تسهیل می‌شود و بازده بهبود می‌یابد. به طور کلی، این نوع سلول‌های خورشیدی از ساندویچ کردن بین لایه‌های کادمیم تلورید به منظور ایجاد یک دیود پیوند p-n ساخته می‌شوند. فرایند ساخت و ساز شامل سه مرحله است. در ابتدا، سلول‌های خورشیدی دارای کادمیم تلورید از مواد چندبلوری سنتز می‌شوند و شیشه به عنوان بستر انتخاب می‌شود. فرایند دوم شامل ترسیب است؛ مثلاً، لایه‌های متعدد سلول‌های خورشیدی کادمیم تلوریدی بر روی بستر با استفاده از روش‌های مقرون به‌صرفه پوشانده می‌شوند. کادمیم تلورید دارای شکاف نواری نوری بهینه مستقیمی با ضریب جذب در حدود $10^{15} \times 5$ بر سانتی‌متر است [۲۵]. بنابراین، بازده آن معمولاً در محدوده ۹ تا ۱۱ درصد است [۲۶]. سلول‌های خورشیدی کادمیم تلورید می‌توانند بر بسترهای بسیاری و انعطاف‌پذیری ساخته شوند. با این حال مسائل زیست محیطی متنوعی در ارتباط با کادمیم سلول خورشیدی وجود دارد. کادمیم به عنوان فلز سنگین و معرف سمی در نظر گرفته شده است که می‌تواند در بدن انسان،

بر اساس گزارشات در سال ۲۰۰۸، اعتقاد بر این است که این نوع سلول‌های خورشیدی ۴۸٪ تولید جهانی سلول‌های خورشیدی را به خود اختصاص می‌دهند [۲۰]. در این سلول‌ها، طی فرایند انجماد سیلیکون مذاب، ساختارهای بلوری متنوعی تشکیل شدند. هرچند ساخت این سلول‌های خورشیدی در مقایسه با صفحات خورشیدی سیلیکونی تک‌بلوری کمی ارزان‌تر است، ولی با این حال بازده آنها کمتر و در حدود ۱۲٪ الی ۱۴٪ اند [۷].

۲-۵ سلول‌های خورشیدی نسل دوم: سلول‌های خورشیدی فیلم نازک^۱

اکثر سلول‌های خورشیدی فیلم نازک و سیلیکون آمورف^۲ جزء سلول‌های خورشیدی نسل دوم‌اند و در مقایسه با سلول‌های خورشیدی نسل اول بسیار مقرون به‌صرفه‌ترند. سلول‌های سیلیکون-پولک دارای لایه‌های جذب نور با ضخامت ۳۵۰ میکرومترند، در حالی که سلول‌های خورشیدی فیلم نازک دارای لایه‌های جذب نور بسیار نازک تقریباً با ضخامت ۱ میکرومتر هستند [۲۱]. سلول‌های خورشیدی فیلم نازک از این قرار دسته‌بندی می‌شوند:

- فیلم نازک سیلیکون آمورف (a-Si)

- فیلم نازک کادمیم تلورید^۳ (CdTe)

- فیلم نازک مس ایندیم گالیم دی‌سلنید^۴ (CIGS)

۱-۲-۵ سلول‌های خورشیدی فیلم نازک سیلیکون آمورف (a-Si)

واحدهای فوتوولتایی سیلیکون آمورف (a-Si) جزء نخستین سلول‌های خورشیدی‌اند که به صورت صنعتی تولید شدند. سلول‌های خورشیدی آمورف (a-Si) می‌توانند در دمای پردازش پایین ساخته شوند. از این رو امکان استفاده از بسپار و دیگر مواد انعطاف‌پذیر مختلف با بهای ارزان در این سلول‌ها وجود دارد. پردازش این مواد نیاز به مقدار کمتری انرژی دارد [۲۲]. بنابراین، سلول خورشیدی a-Si نسبتاً ارزان و به طور وسیعی در دسترس است. این سلول‌ها با پوشش‌دهی مواد سیلیکونی آلیپد به پشت صفحه رشدمایه/ شیشه ساخته شده‌اند و عموماً در سمت بازتابش به

1. Thin Film Solar Cell
2. Amorphous Silicon thin Film (a-Si) Solar Cell
3. Cadmium Telluride (CdTe) thin Film Solar Cell
4. Copper Indium Gallium Di-Selenide (CIGS) Solar Cell

- سلول‌های خورشیدی حساس‌شده (با رنگ، نیمرسانا و پلاسمن)^۱

- سلول‌های خورشیدی دارای نانوبلور^۷

- سلول‌های خورشیدی دارای بسپار^۸

- سلول‌های خورشیدی متمرکز^۹

۵-۳-۱ سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگ‌ها (DSSC)

تحقیقات اخیر به منظور بهبود بازده سلول‌های خورشیدی، بر دستکاری مولکولی تمرکز یافته است [۳۱-۲۸]. نخستین سلول خورشیدی حساس‌شده با رنگ (DSSC) را مایکل گراتزل در مؤسسه فناوری فدرال سوئیس معرفی کرد [۱۶ و ۱۷]. این نوع سلول‌های خورشیدی عموماً مولکول‌های رنگی متنوعی را بین الکترودهای مختلف به کار می‌برند. ابزار DSSC شامل ۴ جزء است: الکتروده نیمرسانا (نوع TiO_2 و نوع NiO نوع p)، یک حساسگر رنگی، حدواسط ردوکس و یک الکتروده شمارشگر (کربن یا پلاتین) [۳۲].

DSSCها به دلیل روش‌های پردازش ساده چون روش‌های چاپ، بسیار انعطاف‌پذیر، شفاف و نیز کم‌هزینه‌اند. سلول‌های خورشیدی DSSC به دلیل حساس‌سازی نوری پوشش‌های TiO_2 نانوذره‌ای روش نوینی به‌شمار می‌آیند که با رنگ‌های فعال جفت شده‌اند که این امر موجب می‌شود بازده به بالای ۱۰٪ برسد [۳۳ و ۳۲ و ۳۰-۲۸]. با این حال، برخی مشکلات خاص نظیر تخریب مولکول‌های رنگی و پس از آن مشکلات پایداری وجود خواهد داشت [۱۶]. مولکول‌های رنگی عموماً پس از قرار گرفتن در معرض پرتوهای فرابنفش و فرسوخ تخریب می‌شوند که این امر به کاهش در طول عمر و پایداری سلول‌ها منجر می‌شود. علاوه بر این، پوشش دادن با لایه حائل نیز ممکن است به هزینه بالا و کاهش بازده انجامد [۷].

در شکل (۶)، فرایند کار در سلول‌های خورشیدی متداول و DSSCها را نشان می‌دهد. برای دستگاه‌های فوتوولتایی با اتصال p-n الکترون‌ها با جذب نور به نوار رسانایی نیمرسانا برانگیخته می‌شوند. سرعت تشکیل جفت الکترون-حفره به عنوان تابعی از فاصله از سطح نیمرسانا به دلیل تغییر میزان جذب نور با تغییر طول موج نور تغییر می‌کند. الکترون‌ها در نیمرسانا از p به n انتقال می‌یابند،

حیوانات و گیاهان ذخیره شود. دفع مواد دارای کادمیم سمی و نیز بازیافت آنها می‌تواند بسیار گران باشد و برای محیط زیست و جامعه ویرانگر باشد [۱۶]. بنابراین، منبع محدودی از کادمیم و خطرات زیست‌محیطی مرتبط با استفاده از آن مشکلات عمده در استفاده از فناوری کادمیم تلورید محسوب می‌شوند [۲۷-۲۴].

۵-۲-۳ سلول‌های خورشیدی فیلم نازک مس ایندیم گالیم دی‌سلنید (CIGS)

CIGS یک نیمرسانایی با ترکیب چهارتایی شامل ۴ عنصر مس، ایندیم، گالیم و سلنیم است [۱۶]. CIGS نیمرسانایی با نوار باند مستقیم نیز هست. در مقایسه با سلول خورشیدی فیلم نازک CdTe، CIGS دارای بازده بالا در حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد است. به دلیل بازده بالا و مقرون به‌صرفه بودن این نوع سلول‌های خورشیدی، CIGS یکی از مناسب‌ترین فناوری‌های فیلم نازک را پدید می‌آورد. پردازش CIGS از طریق روش‌های کندوپاش (اسپاترینگ)^۱، تبخیر^۲، پوشش‌دهی الکتروشیمیایی^۳، چاپ^۴ و ترسیب پرتو الکترونی^۵ انجام می‌گیرد [۱۷]. علاوه بر این، کندوپاش می‌تواند شامل دو یا چند فرایند اعم از ترسیب و به دنبال آن برهمکنش با سلنیم باشد یا می‌تواند یک فرایند واکنشی یک مرحله‌ای باشد. با این حال، تبخیر مشابه با کندوپاش است؛ یعنی می‌تواند در مراحل پردازش یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای یا چند مرحله‌ای به کار رود. پایه‌ها برای مواد CIGS می‌توانند از صفحه شیشه‌ای، بسترهای بسپاری، فولاد، آلومینیم و دیگر مواد انتخاب شوند. مزیت این نوع سلول‌های خورشیدی فیلم نازک، طول عمر زیاد و بدون تخریب درخور توجه است. این خواص CIGS از راه‌حل‌های آسان برای افزایش بازده به‌شمار می‌آیند [۲۶ و ۲۲].

۵-۳ سلول‌های خورشیدی نسل سوم

سلول‌های خورشیدی نسل سوم، فناوری‌های نویدبخش جدیدی‌اند اما هنوز به صورت تجاری و با جزئیات بیشتر بررسی نشده‌اند. اکثر سلول‌های خورشیدی توسعه‌یافته نسل سوم عبارتند از [۶]:

1. Sputtering
2. Evaporation
3. Electrochemical Coating Technique
4. Printing
5. Electron Beam Deposition

6. Plasmon
7. Nano Crystal Based Solar Cell
8. Polymer Based Solar Cell
9. Concentrated Solar Cell

طرح واکنش دارای مراحل است که در شکل (۶-ب) نشان داده شده است [۳۴]:

۱. جذب فوتونی، که از طریق طیف جذبی مواد رنگی شدت طیف تابشی خورشید نیز تعیین می‌شود.

۲. انتقال الکترون سطحی (تزریق الکترون) از رنگ جذب شده به نوار رسانایی نیمرسانا.

۳. نافع‌سازی ماده رنگی تحریک شده توسط نور، جایی که انرژی خورشیدی به صورت نور (بی‌اثرسازی تابشی) یا گرما (بی‌اثرسازی غیر تابشی) ناپدید شده است.

۴. بازگشت به واسطه در الکترولیت.

۵. باز ترکیبی بار در سطح نیمرسانا- ماده رنگی. الکترون‌های انتقال یافته به نوار رسانایی در ماده رنگی اکسید شده در سطح پخش خواهند شد.

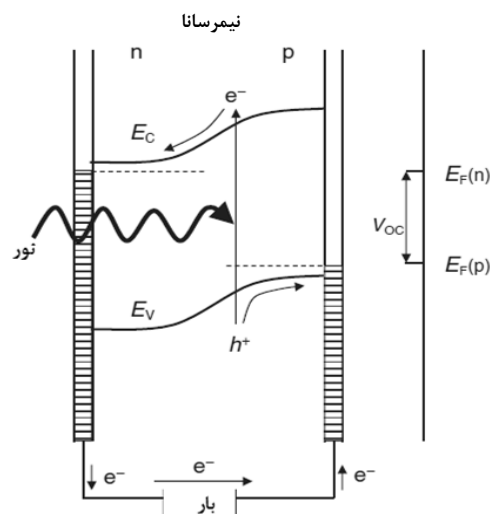
۶. انتقال الکترونی از نوار رسانایی فوتوالکترو نیمرسانا به الکترودهای رسانا که ممکن است با ضریب پخش الکترون (D_n) در نیمرسانا کنترل شود.

۷. تبدیل شکل اکسید شده حدواسط ردوکس (I_3^-) در الکتروده شمارشگر به شکل کاهیده (I^-). در مرحله بعد I^- می‌تواند در سطح ماده رنگی وصل شده به الکتروده اکسید فلزی پخش شود.

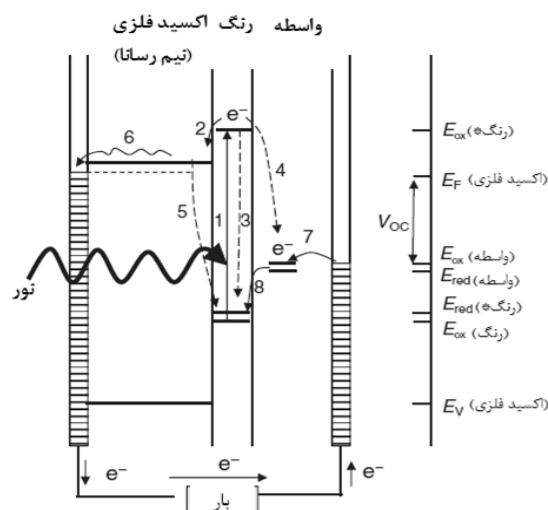
۸. انتقال الکترون به ماده رنگی اکسید شده از یک حدواسط ردوکس در الکترولیت (I^-) برای تشکیل فرم اکسید شده حدواسط ردوکس (I_3^-). برای مرحله ۷، I_3^- تشکیل شده می‌تواند در سطح الکتروده شمارشگر پخش شود.

در شکل (۷)، برنامه زمانی هر مرحله نشان داده شده است [۳۵]. برای حفظ فرایند تشکیل الکترون، ممکن است رقابت دینامیکی این فرایندها اتفاق افتد. در این فرایند مراحل ۳ الی ۵ می‌توانند در مقایسه با مراحل ۲، ۶، ۷ و ۸ آهسته باشند. مطابق شکل (۷)، مهاجرت الکترونی در عرض فیلم نانو بلوری (۶) و به دام‌اندازی ردوکس الکترون (۷)، در مدت زمان چند میلی ثانیه اتفاق می‌افتد. از آنجا که مجذور حاصلضرب طول عمر الکترون و ضریب نفوذ با طول نفوذ الکترون متناسب است، از این رو همه حامل‌های نوری پدید آمده در صورتی که طول نفوذ بزرگتر از ضخامت فیلم باشد، دچار انباشتگی خواهند شد [۳۵].

در حالی که حفره‌های تشکیل یافته ناشی از جذب به منطقه p حرکت می‌کنند. ولتاژ مورد انتظار اختلاف بین ترازهای فرمی ناحیه‌های p و n است. بنابراین، نیمرسانا هر دو وظیفه جذب نور و انتقال حامل‌های باری را بر عهده دارد. در مقایسه، طرح انتقال انرژی الکترونی برای DSSC با سلول‌های خورشیدی با اتصال p-n متفاوت است [۳۴].

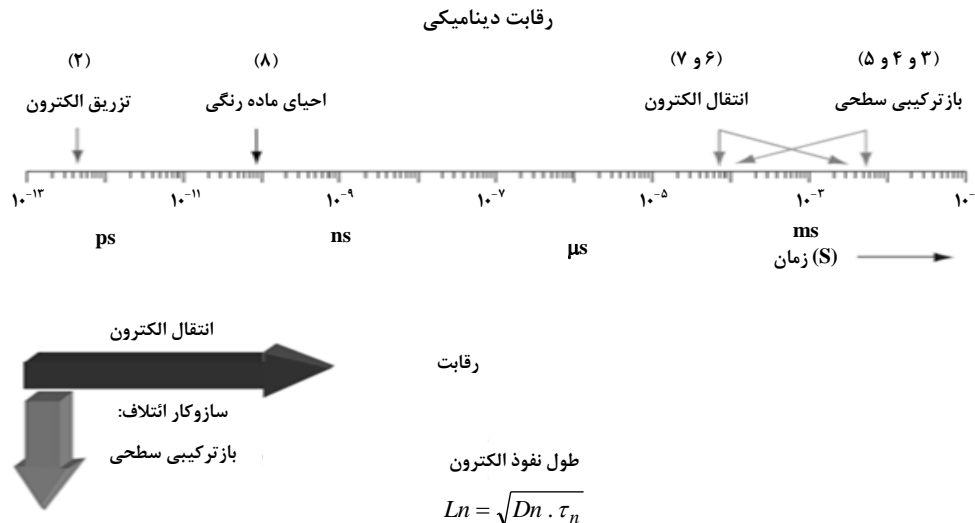


(الف)



(ب)

شکل ۶. نمودار کنش عمل مربوط به: (الف) سلول خورشیدی با اتصال p-n، (ب) DSSC [۳۴].



شکل ۷. دینامیک‌های فرایندهای ردوکس شامل تبدیل نور به جریان الکتریکی با استفاده از DSSC ها (عددهای داخل پرانتز بیانگر مراحل نشان داده شده در شکل ۶-ب هستند) [۳۵].

پیشرفت‌های اخیر در کاربرد مایعات یونی مختلف به عنوان حلال یا اجزای سازنده یک مایع و الکترولیت‌های شبه جامد^۲ برای سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ (DSSC) بررسی شده‌اند [۳۹]. پتانسیل نمک‌های مذاب در دمای اتاق (مایعات یونی) به عنوان حلال برای الکترولیت‌ها در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با استفاده از الکترولیت‌های حالت جامد که با انجماد یک مایع یونی با نانوذرات SiO₂ ساخته شده بودند، بازده کلی ۵/۸۵٪ تحت نور خورشید ۱ AM^۳ (بیانگر زاویه تابشی خورشید به زمین) به دست آمد [۴۰]. TiO₂ به علت خواص مطلوبی چون شکاف باند عریض، پایداری شیمیایی و نانوساختارهای موجود با روش‌های ساخت مناسب به طور گسترده‌ای به عنوان یک ماده انتقال الکترونی مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور یافتن جایگزین‌های مناسب برای TiO₂، سایاما [۴۱] و همکارانش اکسیدهای فلزی مختلفی چون فیلم‌های نیم‌رسانای متخلخلی چون ZnO، Nb₂O₅، SnO₂، In₂O₃، WO₃، Ta₂O₅ و ZrO₂ را به عنوان نیم‌رساناهای انتقال الکترون بررسی کردند. بنابر نتایج به دست آمده، سلول نیم‌رسانای Nb₂O₅ از بالاترین درصد تبدیل نور خورشید بعد از TiO₂ برخوردار است و بالاترین ولتاژ نوری مدار باز^۴ (V_{oc}) را در بین آنها از خود نشان می‌دهد. الکترودهای

ترایبوش [۳۶] سامانه‌های حساس شده با رنگ را آنالیز کرد و به این نتیجه رسید که نقطه چالش برانگیز عمده نقش جداسازی بار برگشت‌ناپذیر سینتیکی در محیط‌های نانوبلوری است. میدان الکتریکی که عامل جداسازی بار در دستگاه‌های فوتولتایی کلاسیک است، به تدریج و به صورت تجربی با سینتیک‌های لایه‌ای برگشت‌ناپذیر جایگزین شده است که همان وظیفه را در جداسازی بار انجام می‌دهند، ولی به شرایط کاملاً متفاوت فیزیکی/ شیمیایی نیاز دارند [۳۶]. برای سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ، این سینتیک‌های برگشت‌ناپذیر هم در نانوذرات و هم در اکسید قلع آلیپیده با فلئور (FTO)^۱ در هردو مهم‌اند [۳۷].

تعداد زیادی الکترولیت‌ها، هم جامد و هم مایع برای کاربردهای DSSC پیشنهاد شده است. یکی از ابزارهای حالت جامد، شامل p-CuI، نخستین بار توسط تانکن [۳۸] و همکارانش معرفی شدند. مواد دارای مس از قبیل CuI و CuSCN به طور وسیعی به عنوان مواد دارای رسانایی بالا بررسی شده‌اند. اگرچه CuI ماده نویدبخشی است، اما سلول‌های حاصل عموماً پایدار نیستند. همچنین، وقتی TiO₂ با یک لایه نازک از MgO برای حساس‌سازی نسبت به رنگ‌ها پوشانده شده بود، بازده ۴/۷٪ حاصل شد. لایه MgO عملکرد سلول را به خاطر ممانعت از بازترکیبی جفت الکترون- حفره افزایش می‌دهد.

2. Quasi-Solid
3. Air Mass
4. Open-Circuit Photovoltage

1. Fluorine Doped Tin Oxide

در دستگاه‌ها و سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی (PEC)، نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره‌ای می‌توانند به عنوان یک مسیر انتقال بار موثر و یا به عنوان نانو و مزو داربست‌های^۲ یک بعدی برای جمع‌آوری مولکول‌های فعال نوری به منظور تسهیل انتقال بار از طریق آرایش‌های مولکولی عمل کنند [۳۴].

۵-۳-۲ سلول‌های خورشیدی حساس شده با نیم‌رسانا^۳ (SSSCs) می‌توان به جای مولکول‌های رنگی، نانوذرات نیم‌رسانا را جایگزین کرد که اکسایتون^۴‌هایی را با جذب نور ایجاد می‌کنند. طول موج آستانه جذب، به اندازه و نیز شکاف نواری نیم‌رساناها بستگی دارد [۳۴].

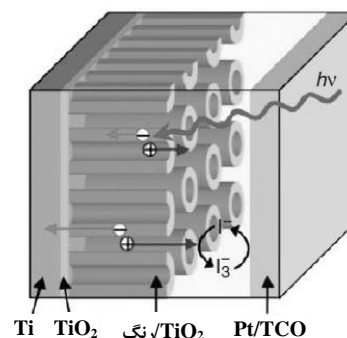
ولر و همکارانش [۴۶] برای اولین بار روشی را برای حساس‌سازی الکترودهای TiO_2 با تخلخل زیاد به کمک ذرات CdS با اندازه‌های کوانتومی (۴ تا ۲۰ نانومتر) ارائه کردند که بازده جریان نوری بیشتر از ۷۰٪ و ولتاژ نوری ۴۰۰ میلی‌ولت با بهره‌گیری از تابش نور مرئی به دست آمد. جذب نقاط کوانتومی^۵ $CdSe$ (QDs) بر روی فیلم‌های TiO_2 نانو ساختاری را توپودا و همکارانش [۴۷] بررسی کردند که نتایج نشان داد پوشاندن ZnS بر روی نقاط کوانتومی $CdSe$ بازده تبدیل فوتولتایی را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. نتایج نشان داد که تحت تابش نور خورشید با شدت ۱۰۰ میلی‌ولت بر سانتی‌متر مربع، بازده ۲/۰۲٪ برای سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی^۶ $CdSe$ (QDSSC) حاصل می‌شود.

آرایش‌های نانوسیمی ZnO تک بلوری رشد یافته بر روی بستر شیشه‌ای رسانا، به عنوان نوع جدیدی از سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی (QDSSC) که شامل نانو بلورهای نیم‌رسانا CdS [۴۸] و $CdSe$ [۴۹] به عنوان مواد جمع‌کننده نوری بودند، به کار برده شده‌اند. در شکل (۹) ساختار سلول خورشیدی حاصل از نقاط کوانتومی $CdSe$ با نانو سیم ZnO و بازده طیفی سلول خورشیدی (IPCE) را، به ترتیب، مشاهده می‌کنید. بازده‌های کوانتومی درونی با مقدار ۵۰٪ تا ۶۰٪ با تابش ۱/۵ AM و با شدت ۱۰۰ میلی‌ولت بر سانتی‌متر مربع به دست آمد [۴۹].

اکسید فلزی مزوپور فاقد TiO_2 نیز برای این نوع سلول‌ها بررسی شوند و خواص مطلوب برای الکترودهای با عملکرد بالا در زیر خلاصه شده‌اند [۴۲]:

- شکاف نوار نیم‌رسانا باید عریض باشد و بین جذب نور در نیم‌رسانا و رنگ همپوشانی اندکی برقرار باشد.
- تراز انرژی نوار رسانایی نیم‌رسانا باید به طور مناسبی برای پذیرش الکترون‌ها از مولکول‌های رنگی برانگیخته هم‌تراز باشد.
- مواد زمانی که به عنوان یک فیلم مزوپور ساخته شوند، به تحرک حامل بار بالا نیاز دارند.
- فیلم‌های ساخته شده از مواد باید مساحت سطح فراوانی را برای بهره‌گیری نوری موثر از یک تک لایه رنگ جذب سطحی شده ارائه دهند.

آرایش‌های نانولوله‌ای TiO_2 با نظم پدمانه می‌توانند از طریق اکسایش آنودی تیتانیوم در الکترولیت‌های دارای فلورید ساخته شوند [۴۳]. نانولوله‌های TiO_2 خود سازمان یافته^۱ با هدف ایجاد مسیر انتقال الکترونی بهبود یافته در TiO_2 ساخته شده‌اند (شکل (۸)) [۴۴]. می‌توان تصور کرد که آرایش‌های نانولوله‌ای باید بار را مستقیماً در طول نانولوله به سمت الکتروود و به دور از نوسان بار و به دام‌اندازی در مرزهای نانوذرات انتقال دهند. البته باید فرض شود که انتقال بار در TiO_2 مزوپوری از طریق دام‌اندازهای بین ذره‌ای محدود شده است و این که اندازه بلورها در نانولوله‌ها در مقایسه با نانوذره‌ها بزرگتر است.

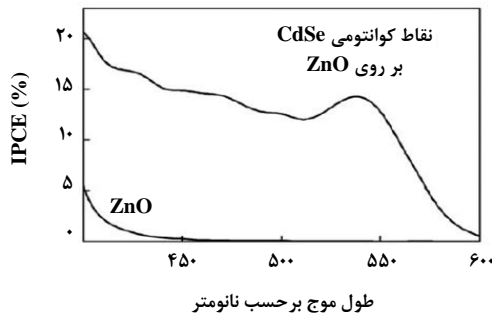


شکل ۸. آرایش نانولوله‌ای TiO_2 [۴۴].

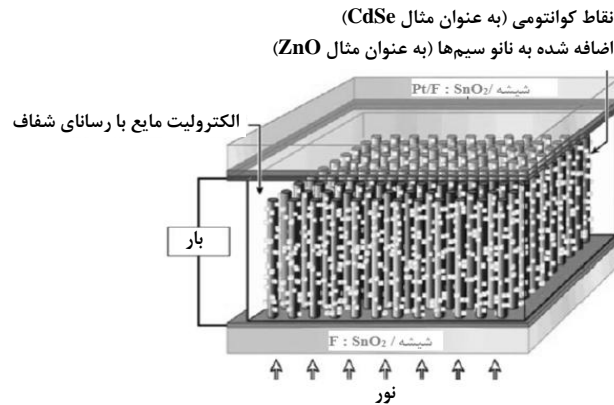
به منظور تبدیل انرژی خورشیدی، الکترودهای اصلاح شده با نانولوله‌های کربن می‌توانند جایگزین نانو بلورهای TiO_2 شوند [۴۵].

1. Self- Organized

2. Meso Scaffold
3. Semiconductor-Sensitized Solar Cells
4. Exciton
5. Quantum Dot
6. Quantum Dot Sensitized Solar Cell



(ب)



(الف)

شکل ۹. (الف) طرحی از سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی. (ب) طیف IPCE سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی و نانوسیم‌های ZnO حساس نشده [۴۹].

حداکثر درصد تبدیل در ۶۰۰ نانومتر فقط ۰/۳۵٪ بود با این حال یان و تاتسوما اظهار داشتند که جدایی بین ایندیم قلع اکسید (ITO) و TiO_2 و به کارگیری زوج‌های ردوکس با پتانسیل‌های خیلی منفی ممکن است پاسخ‌های نوری و بازده‌ها را افزایش بدهد [۵۴]. فیوروب و همکارانش [۵۵] به طور مستقیم با استفاده از طیف‌نمایی جذب گذرای فمتوثانیه‌ای^۲، انتقال الکترونی ناشی از پلاسمن را از نانو نقاط طلا، ۱۰ نانومتری به نانوذرات TiO_2 مشاهده کردند. زمان واکنش در حد ۲۴۰ فمتوثانیه بود و بازده در حدود ۰/۴۰٪ بود ولی برگشت الکترون از TiO_2 به طلا خیلی سریع بود (در حد ۱۰۰ پیکوثانیه). به خاطر این که ضریب جذب نقاط کوانتومی طلا در مقایسه با مولکول‌های رنگی معمولی بالاست، اگر انتقال برگشتی الکترون به طور موثری بتواند متوقف شود، آنها می‌توانند به عنوان منبع الکترونی خوبی در ابزارهای نانو، مانند سلول‌های خورشیدی حساس شده با پلاسمن‌ها به کار روند.

۴-۳-۵ سلول‌های خورشیدی دارای نانوبلور

سلول‌های خورشیدی حاوی نانوبلور عموماً سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی شناخته می‌شوند. این سلول‌های خورشیدی ترکیبی از یک نیمرسانا، عموماً از گروه فلزات واسطه‌اند که در مقیاس نانوبلوری ساخته شده از مواد نیمرسانا هستند [۷]. نقاط کوانتومی، بلورهای نیمرسانا در ابعاد نانو (۱ تا ۱۰ نانومتر) اند. این نانوساختارها

هودس [۵۰]، سلول‌های خورشیدی حساس شده با نیمرساناها را با سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ مقایسه کرد و اختلاف بین این دو نوع سلول را از دیدگاه زمان انتقال بار معمولی برای تولید جریان‌های متفاوت و فرایندهای باز ترکیبی بررسی کرد.

۵-۳-۳ سلول‌های خورشیدی حساس شده با پلاسمن‌ها

نانوذرات بسیاری از فلزات از قبیل نقره و طلا به دلیل حضور تشدید پلاسمن سطحی با طول موجی وابسته به اندازه، شکل و محیط دی‌الکتریک نانوذرات، خواص جذب و پخش نوری چشمگیری را بروز می‌دهند [۵۱].

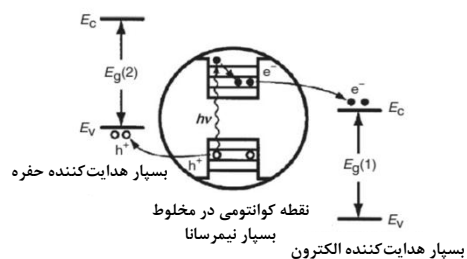
در سال‌های اولیه ابداع و ارائه فوتوالکتروشیمی، واکنش الکترونی پلاسمن سطحی ذرات Ag توسط گریشر و همکارانش [۵۲]، بررسی شد و آنان به این نتیجه رسیدند که حفره‌های برانگیخته شده در فلز با یک الکترون دهنده در الکترولیت واکنش می‌داد و الکترون‌های حاصل وارد محلول نشدند. یان و تاتسوما [۵۳]، فوتوالکتروشیمی ناشی از پلاسمن در ناحیه مرئی در مورد کامپوزیت‌های نانو حفره‌ای TiO_2 حاوی نانوذرات طلا را که از ترسیب طلا در حفره‌های فیلم TiO_2 ساخته شده بودند، گزارش کردند. در این مطالعه، در حضور واسطه الکترونی ($Fe^{2+/3+}$) تبدیل بهینه ۰/۲۶٪ حاصل شد. نانوذرات طلا پلاسمنی در تماس با نیمرسانای TiO_2 به عنوان حساس کننده‌های نوری ایجاد می‌کنند. اخیراً یان و تاتسوما مشاهده کردند که برای ساختار ITO/Au/ TiO_2 انتقال الکترونی از نانوذرات پلاسمنی طلا به فیلم TiO_2 در کامپوزیت رخ داده است. هرچند

1. Indium tin oxide
2. Femtosecond Transient Absorption Spectroscopy

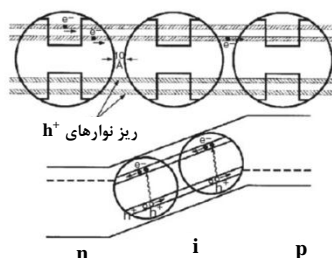
۳- نقاط کوانتومی پراکنده در مخلوطی از بسپارهای در حالت تماس با الکترون و حفره.

در آرایه‌های نقطه کوانتومی، در آرایش سلولی p-i-n، نقاط کوانتومی در یک آرایش سه بعدی با فاصله بسیار کم از همدیگر قرار گرفته‌اند که این امر به جفت‌سازی الکترونی قوی می‌انجامد و ریز نوارهای تشکیل شده به انتقال الکترونی در محدوده وسیع منجر می‌شوند (شکل (۱۰)).

نوزیک و همکارانش [۵۷] سلول‌های خورشیدی شاتکی^۲ دارای فیلم‌های نانو بلوری کلئیدی (شکل (۱۱)- الف) را گزارش کردند. فیلم نانو بلوری PbSe به روش پوشاندن لایه به لایه رسوب داده شده بود و سلول درصد تبدیلی در حدود ۵۵٪ تا ۶۵٪ در نور مرئی و بیشتر از ۲۵٪ در ناحیه فرورسرخ طیف خورشیدی نشان داد. بازده چشمگیر تبدیل با تابش خورشیدی AM 1.5، مطابق منحنی ولتاژ- جریان (I-V) در شکل (۱۱)- ب، ۲۱٪ بود.

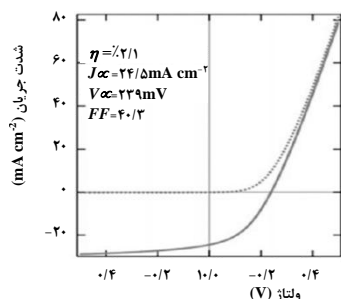


(ب)

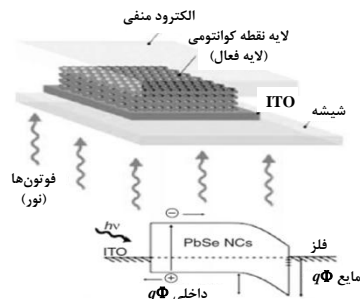


(الف)

شکل ۱۰. ترازهای انرژی؛ (الف) در یک آرایش نقطه کوانتومی به کار گرفته شده به عنوان یک فوتوالکتروود برای یک سلول فوتوالکتروشیمیایی یا یک سلول فوتو ولتایی p-i-n (ب) در نقاط کوانتومی پخش شده در مخلوطی از پلیمرهای رسانای الکترون و حفره [۵۷].



(ب)



(الف)

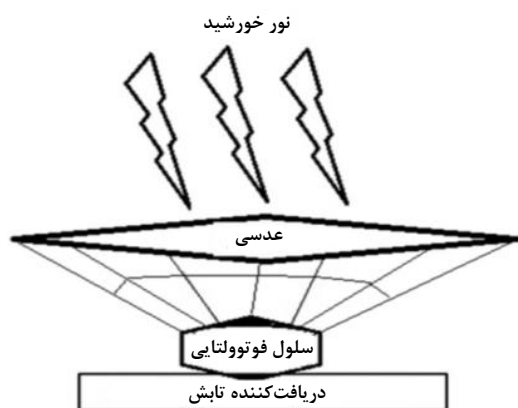
شکل ۱۱. سلول خورشیدی شاتکی ساده از فیلم ساندویچ شده فلز/ نانوبلور/ فلز معدنی (الف) ساختار و نمودار نواری (ب) مشخصه‌های ولتاژ- جریان در تاریکی و تحت تابش نور خورشید [۵۸].

1. Quantum Well

2. Schottky

۵-۳-۶ سلول‌های خورشیدی کانونی‌ساز

این سلول‌ها از سال ۱۹۷۰ ساخته شده‌اند [۶۷ و ۶۸] و جدیدترین فناوری در زمینه سلول‌های خورشیدی به‌شمار می‌آیند. مطابق شکل (۱۲)، اساس این سلول‌ها گردآوری مقدار زیادی انرژی خورشیدی بر روی منطقه کوچکی از سلول خورشیدی فوتولتایی است.



شکل ۱۲. نموداری از سلول‌های خورشیدی کانونی‌ساز [۶۷ و ۶۸].

اساس این فناوری بر پایه اصول اپتیک با بهره‌گیری از آینه‌ها و عدسی‌های بزرگ است که چنان تنظیم می‌شوند که نور خورشید را بر روی ناحیه کوچکی از سلول‌های خورشیدی کانونی کنند [۷]. همگرایی تابش‌های خورشیدی مقداری زیاد انرژی گرمایی تولید می‌کند. این انرژی گرمایی به کمک یک موتور گرمایی کنترل شده با یک مولد برق هدایت می‌شود. سلول‌های خورشیدی کانونی شده ماهیت امیدوارکننده‌ای در زمینه خورشیدی به‌شمار می‌آیند [۶۸ و ۶۹]. این سلول‌ها بسته به قدرت سامانه‌های عدسی به سه دسته سلول‌های خورشیدی کانونی شده کم، متوسط و زیاد دسته بندی می‌شوند [۶۸]. فناوری فوتولتایی تمرکز یافته دارای مزایایی چون بازده‌های بالای ۴۰٪، فقدان هرگونه قطعات متحرک، فقدان توده گرمایی، زمان پاسخ‌دهی سریع و نیز به طیف وسیعی از اندازه‌ها مورد استفاده است [۷]. در جدول (۲) مقایسه بین حالات مختلف سلول‌های خورشیدی را که در بالا بررسی شدند، درج شده است.

توریموتو [۵۹] و همکارانش به ساختن فیلم‌های چند لایه‌ای معدنی به کمک روش تراکم لایه به لایه توفیق یافتند که در آن نانوذرات CdS با اندازه‌های مختلف و نانو ورقه‌های هیدروکسیدهای دو لایه^۱ (LDH) ساندویچ شده‌اند. هرچند درصد تبدیل خیلی بالا نبود ولی آنان توانستند یک انتقال برداری الکترون را از ذرات کوچکتر به ذرات بزرگتر بخاطر اختلاف در ترازهای انرژی ایجاد شده ناشی از اثر اندازه کوانتومی را نشان دهند.

۵-۳-۵ سلول‌های خورشیدی بسپاری

سلول‌های خورشیدی بسپاری (PSC) عموماً به علت بستر بسپاری، سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیری هستند. نخستین نمونه از سلول‌های خورشیدی بسپاری (PSC) را گروه تحقیقاتی تانگ و همکارانش ساختند [۶]. هر سلول خورشیدی بسپاری ترکیبی از لایه‌های نازک پوشیده شده بر ورقه یا نواری بسپاری است. این سلول‌ها گاه به عنوان ترکیبی از دهنده (بسپار) و یک پذیرنده (فولرن^۲) عمل می‌کنند. در این سلول‌ها انواع گوناگونی مواد شامل مواد آلی برای جذب نور به کار می‌روند [۶۰ و ۶۱]. در سال ۲۰۰۰، هگر، مک دیارمید و شیراکاوا جایزه نوبل را در شیمی به خاطر کشف رده جدیدی از مواد بسپاری دریافت کردند که به آنها بسپارهای نیمرسانا گفته می‌شود [۶۲ و ۶۱]. PSC و دیگر سلول‌های خورشیدی مواد آلی بر روی اصل مشابهی عمل می‌کنند که به آن اثر فوتولتایی می‌گویند [۶۳]. یو و همکارانش [۶۴] پلی [۲-متوکسی-۵-(ethylhexyloxy-۲')-پارافنیلین وینیلین] (PPV)، C₆₀ و دیگر مشتقات آن را به منظور ساخت و تولید نخستین سلول خورشیدی بسپاری مخلوط کردند و بازده تبدیل بالایی را به دست آوردند. این فرایند به ابداع و ایجاد نسل جدیدی از مواد بسپاری برای اخذ توان خورشیدی بیشتر منجر شد. پس از بهینه‌سازی پارامترها، محققان بازدهی در حدود ۳٪ برای سلول‌های خورشیدی بسپاری (PSC) نوع PPV به دست آوردند [۶۶-۶۴]. خواص منحصر به فرد این سلول‌ها، مسیر جدیدی را برای کاربردهای جدید در شکل‌گیری دستگاه‌های خورشیدی دارای منسوجات و پارچه‌ها گشود [۶۵].

1. Layered Double Hydroxide
2. Fullerene

جدول ۲. مقایسه عملکرد انواع مختلف سلول‌های خورشیدی [۱۸ و ۱۷ و ۷].

جزئیات اضافی	قیمت	اندازه	عملکرد در دمای بالا	بازده	نوع سلول	
قدیمی‌ترین فناوری PV	۲ بار گران‌تر در مقایسه با فیلم نازک	حجم به‌طور چشمگیری کمتر	عملکرد نامناسب	۱۷/۵-۱۴٪	تک‌بلوری	سیلیکون بلوری
انتخاب اقتصادی	۲ بار گران‌تر در مقایسه با فیلم نازک	حجم به‌طور چشمگیری کمتر	عملکرد نامناسب	۱۴-۱۲٪	چندبلوری	سیلیکون بلوری
سمی به علت Cd	۵۰٪ ارزان‌تر از سلول‌های سیلیکونی	طیف گسترده‌ای از محصول انعطاف‌پذیر، سبک و بادوام	مناسب در سرما و شرایط دمایی بالا	۹-۱۱٪	CdTe	سیلیکون بلوری
برخی دارای ۲۰٪ بازده چشمگیرتری‌اند.	۵۰٪ ارزان‌تر از سلول‌های سیلیکونی	طیف گسترده‌ای از محصول انعطاف‌پذیر، سبک و بادوام	مناسب در سرما و همچنین در شرایط دمایی بالا	۱۲-۱۰٪	CIGS	فیلم نازک
نیاز به زمان زیاد برای راه‌اندازی و همچنین فضای بیشتر است.	۵۰٪ ارزان‌تر از نوع سلول‌های سیلیکونی	طیف گسترده‌ای از محصول انعطاف‌پذیر، سبک و بادوام	مناسب در سرما و همچنین در شرایط دمایی بالا	۸-۴٪	سیلیکون آمورف	سیلیکون بلوری
به زمان کمتر و فضای بیشتر برای راه‌اندازی نیاز دارد.	۵۰٪ ارزان‌تر از سلول‌های سیلیکونی	طیف گسترده‌ای از محصول انعطاف‌پذیر، سبک و بادوام	پایداری حرارتی بالا	۸-۷٪	نانوبلور	سیلیکون بلوری
به زمان کمتر و فضای بیشتر برای راه‌اندازی نیاز دارد.	۵۰٪ ارزان‌تر از سلول‌های سیلیکونی	طیف گسترده‌ای از محصول انعطاف‌پذیر، سبک و بادوام	عملکرد نامناسب در دمای بالا	تقریباً ۱۰٪	حساس‌شده با رنگ	نسل سوم
به زمان و فضای کمتری برای راه‌اندازی نیاز دارد.	۵۰٪ ارزان‌تر از سلول‌های سیلیکونی	طیف گسترده‌ای از محصول انعطاف‌پذیر، سبک و بادوام	عملکرد نامناسب در دمای بالا	در حدود ۱۰-۳٪	بسیار	نسل سوم
به زمان و فضای زیادی برای راه‌اندازی نیاز دارد.	۵۰٪ ارزان‌تر از سلول‌های سیلیکونی	ارائه طیف خاصی از طراحی محصول	پایداری حرارتی عالی	تقریباً ۴۰٪	متمرکز (کانونی‌شده)	نسل سوم

ظرفیت انباشته به حدود ۱۸۸/۸ گیگاوات رسید [۷۰].
براساس اتحادیه بازار فوتوولتایی^۱ (گزارش اخیر در ۱۵ ژوئن ۲۰۱۶)
بازارهای جهانی PV باید دست‌کم به ۶۰ گیگاوات در ۲۰۱۶ و بیشتر

از سال ۲۰۰۰ تاکنون، به دلیل کاهش هزینه برق تولیدی به روش PV، صنعت جهانی PV به بازاری با پیشرفت سریع تبدیل شده و ظرفیت برق تولیدی به این روش سالیانه افزایش یافته است. در سال ۲۰۱۴، ظرفیت برق تولیدی به روش PV، ۴۷ گیگاوات بود که با

1. Photovoltaic (PV) Market Alliance

خورشیدی فیلم نازک دارای مزایایی از جمله هزینه کم‌ترند، اما عموماً نسبت به سلول‌های خورشیدی بلوری بازده کمتری دارند. غالب‌ترین فناوری‌های فیلم نازک در اروپا سلول‌های خورشیدی CdTe و CIGS هستند. تاکنون در زمینه فناوری فیلم نازک شرکت First Solar پیشرو است که هزینه‌های ساخت و ساز واحدهای کادمیم تلورید آن کمتر از هزینه‌های ساخت و ساز اکثر سلول‌های بلوری است [۷۱]. امروزه در مقیاس‌های آزمایشگاهی سلول‌های خورشیدی با بازده‌های بالای ۴۶٪ نیز به دست آمده‌اند [۷۲]. هرچند هزینه تولید این سلول‌های خورشیدی بالاست. در سال ۲۰۱۵، سهم سلول‌های خورشیدی فیلم نازک برای تمامی فناوری‌های مبتنی بر فیلم نازک تنها ۱۰٪ بود و پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۱۷ به کمتر از ۷٪ نیز برسد. فناوری‌های نوظهور چون سلول‌های خورشیدی مواد آلی، نقاط کوانتومی، پروسکیت و فناوری‌هایی نظیر آن موضوع مطالعات R&D هستند و در بازار PV تاکنون به کار گرفته نشده‌اند [۷۱]. براساس جدول‌های بازده سلول‌های خورشیدی [۷۲]، بازده ثبت شده برای سلول‌های مواد آلی معادل ۱۱/۲٪ و برای سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ حدود ۱۱/۹٪ است. برای سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی بازده ثبت شده ۱۱/۶٪ است که اخیراً به دست پژوهشگرانی از دانشگاه‌های چین گزارش شده است [۷۳]. افزایش چشمگیر بازده سلول‌های خورشیدی پروسکیتی از ۳٪ به ۴٪ در سال ۲۰۰۹ تا حد نصاب اخیر آن که ۲۲/۱٪ بود، به ترفیع این فناوری به جایگاهی فراتر از سلول‌های خورشیدی نسل سوم منجر می‌شود [۷۴]. فناوری‌های مبتنی بر سلول‌های خورشیدی پروسکیتی به عنوان یکی از بزرگترین موفقیت‌های سال ۲۰۱۳ از سوی نشریات Science و Nature انتخاب شده‌اند [۷۱].

۶. مشکلات و ویژگی‌های استفاده از انرژی خورشیدی

با وجود مزایای متعدد مرتب بر انرژی خورشیدی، این انرژی از چندین محدودیت نیز برخوردار است. اولاً انرژی خورشیدی در طول شب تابیده نمی‌شود ثانیاً انرژی خورشیدی در تمامی زمان‌ها ثابت نیست. باید مقدار زیادی نور برای تولید انرژی الکتریکی از یک ابزار فوتوولتایی^۳ (PV) خورشیدی بتابد [۱۶ و ۶۹]. همچنین، علاوه بر تأثیر نوسانات روزانه در شدت انرژی تابشی، انرژی خورشیدی

از ۷۰ گیگاوات در ۲۰۱۷ برسند [۷۱]. این پیش‌بینی از طریق گزارش‌های انجمن صنعت فوتوولتایی اروپا^۱ (EPIA) که بیانگر مقدار ۵۴۰ گیگاواتی در سطح جهان تا پایان سال ۲۰۱۹ است، تأیید شده است. افزایش در تأسیسات با کاهش قیمت‌های سلول‌های خورشیدی همراه است. در مجله PV گزارش می‌شود که در ژوئن ۲۰۱۶ قیمت کارآمدترین واحدها تا 0.7 €/W_p کاهش یافت، در حالی که بهای پر رونق‌ترین واحدها تنها حدود 0.5 €/W_p است. در اینجا، W_p نماد توان واحد در حداکثر نقطه توان برای شرایط آزمون استاندارد^۲ است. این اعداد نشان می‌دهند که بازار PV به سرعت در حال رشد و گسترش، و آینده این سلول‌ها بسیار امیدوارکننده است [۷۱].

با در نظر داشتن دسته بندی‌های گوناگون این سلول‌ها که در بخش‌های قبلی مورد توجه قرار گرفتند، می‌توان گفت که تاکنون دسته اول سلول‌های خورشیدی یعنی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به دلیل دارا بودن فناوری تکامل یافته بر بازار PV حاکم بوده است. در سال ۲۰۱۵ حدود ۹۳٪ بازار خورشیدی به سیلیکون بلوری تعلق داشت که از این مقدار ۲۴٪ به سیلیکون تک‌بلوری و ۶۹٪ به سیلیکون چندبلوری مربوط می‌شد. سهم سیلیکون‌های بلوری در چند سال اخیر به علت ورود گسترده تولیدکنندگان چینی به عرصه، به سرعت رشد کرده است [۷۱].

از زمان ابداع سلول‌های خورشیدی دانشمندان در جستجوی مواد جایگزین جاذب برای سیلیکون‌اند. ضخامت استاندارد فعلی پولک سیلیکون بلوری حدود $180 \mu\text{m}$ است اما هدف، دستیابی به ضخامت کمتر از $100 \mu\text{m}$ است، چون پولک Si خالص هزینه اصلی سلول‌های خورشیدی سیلیسیم را در برگیرد. سیلیکون در حالت خالص (خلوص ۹۹/۹۹۹۹٪ برای کاربردهای خورشیدی) بسیار گران‌بهاست و حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد هزینه صفحات بلوری را می‌سازد. در فناوری فیلم نازک همانطور که قبلاً نیز اشاره شده است، مواد جاذب جایگزینی نظیر سیلیکون آمورف (a-Si)، ترکیب نیمرسانای کادمیم تلورید و دیگر مواد به کار گرفته می‌شوند. در این مواد چون مواد جاذب با ضخامت‌های کم به کار گرفته می‌روند، به همین دلیل هزینه مربوط به این سلول‌ها کمتر است. هزینه نیمرسانا در این فیلم‌های نازک حدود ۲٪ است. سلول‌های

1. European Photovoltaic Industry Association
2. Standard Test Condition

3. Photovoltaic

مراجع

- [1] Chu, Y., "Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies", Global Energy Network Institute Diego, (2011).
- [2] Scherr, S. J., Sthapit, S., "Farming and Land Use to Cool the Planet, in State of the World 2009 Into a Warming World", Worldwatch Institute: United States of America. p. 30-4, (2009).
- [3] "Annual energy review 2009", U.S. Energy Information Administration: Washington, DC. p. 1-408, (2010).
- [4] McEvoy, A., Castaner, L., Markvart, T., "Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation", Elsevier Ltd: Oxford. p. 3-25, (2012).
- [5] Bube, R. H., "Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion", New York: Academic Press Inc, (1983).
- [6] Choubey, P. C., Oudhia, A., Dewangan, R., "A review: Solar cell current scenario and future trends", Recent Research in Science and Technology, 4, 99-101, (2012).
- [7] Sharma, S., Jain, K. K., Sharma, A., "Solar Cells: In Research and Applications—A Review", Materials Sciences and Applications, 6, 1145-1155, (2015).
- [8] Nabhani, N., Emami, M., "Nanotechnology and its Applications in Solar Cells", in International Conference on Mechanical and Industrial Engineering (ICMIE'2013), Penang (Malaysia). p. 88-91, (2013).
- [9] Baxter, J. B., Richter, C., Schmuttenmaer, C.A., "Ultrafast Carrier Dynamics in Nanostructures for Solar Fuels", Review in Advance, 65, 423-447, (2014).
- [10] Fujishima, A., Honda, K., "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode", Nature, 238, 37-38, (1972).
- [11] J. Nozik, A., "Photoelectrochemistry: Applications to Solar Energy Conversion", Annual Review of Physical Chemistry, 29, 189-222, (1978.)
- [12] Chen, Z., Jaramillo, T. F., Deutsch, T. G., Kleiman-Shwarsctein, A., Forman, A. J., "Accelerating materials development for photoelectrochemical hydrogen production: Standards for methods, definitions, and reporting protocols", Journal of Materials Research, 25, 3-16, (2010).
- [13] Walter, M. G., Warren, E. L., McKone, J. R., Boettcher, S. W., Mi, Q., Santori, E.A., Lewis, N.S., "Solar Water Splitting Cells", Chemical Reviews, 110, 6446-6473, (2010).
- [14] Hill, R., Bendall, F., "Function of the Two Cytochrome Components in Chloroplasts: A Working Hypothesis", Nature, 186, 136-137, (1960).
- [15] Yadav, A., Kumar, P., "Enhancement in Efficiency of PV Cell through P&O Algorithm", International Journal for Technological Research in Engineering, 2, 2642-2644, (2015).

در خلال برقراری شرایط آب و هوایی بد نمی‌تواند به سطح زمین برسد. مثلاً مقدار نور خورشید دریافتی در سطح زمین، به محل، زمان و نیز نوع آب‌وهوا بستگی دارد [۱۶]. برای غلبه بر معایب این فناوری، انرژی خورشیدی باید در جای دیگری در طول شب ذخیره شود و سلول‌های خورشیدی و واحدهای بسیار کارآمدی به منظور پیشرفت در این زمینه مورد نیازند [۷].

۷. نتیجه‌گیری کلی

تولید انرژی الکتریکی با استفاده از خورشید به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر است که بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این روش نسبت به سایر شکل‌های انرژی چون سوخت‌های فسیلی و ذخایر نفتی مزیت‌های زیادی دارد. این روش جایگزینی فناوری نویدبخش و سازگار با تقاضای بالای انرژی است. اگرچه روش‌های تبدیل مصرف انرژی خورشیدی ساده است اما هنوز به تجهیزات خورشیدی موثر و بادوام نیاز است. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته، فناوری مبتنی بر سلول خورشیدی دارای نیم‌رسانای نقطه کوانتومی از لحاظ نظری بیشتر از ۶۰٪ از کل طیف خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سلول‌های خورشیدی بر پایهٔ بسپارها و نیز یک گزینه با دوام زیاد مبتنی است. با این حال، تخریب آنها در طول زمان نگرانی جدی است. سامانه‌های فوتوولتایی متمرکز (کانونی)، سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ و سامانه‌های گرماالکتریکی خورشیدی فناوری‌های نوظهوری در حال مطالعه و بررسی‌اند. در بلند مدت، این سامانه‌ها ممکن است سهم چشمگیری از بازار را به خود اختصاص دهند. تأکیدهای فراوانی بر صفحات خورشیدی فوتوولتایی و انرژی خورشیدی شده است، چون این دو مورد جزء دو فناوری رایج‌اند و انتظار می‌رود در کوتاه و بلند مدت از رشد شتابانی برخوردار باشند. در حال حاضر، امکان این پیش‌بینی وجود ندارد که کدام فناوری بیشترین سهم را در بازارهای آینده به دست خواهد آورد. چالش‌های مختلفی برای این صنعت شامل کاهش هزینه‌های تولید، آگاهی همگانی و بهترین زیرساخت وجود دارد. انرژی خورشیدی نیاز روز است و تحقیقات بر روی سلول‌های خورشیدی دارای یک آینده امیدواربخشی در سر تا سر جهان است.

- [16] Askari, M. B., Abadi, V. M. M., Mirhabibi, M., "Types of Solar Cells and Application", *American Journal of Optics and Photonics*, 3, 94-113, (2015).
- [17] Srinivas, B., Balaji, S., Babu, M. N., Reddy, Y. S., "Review on Present and Advance Materials for Solar Cells", *International Journal of Engineering Research-Online*, 3, 178-182, (2015).
- [18] Würfel, P., "Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts", 2nd ed, Hoboken: John Wiley & Sons, (2009).
- [19] Dimitrijević, S., "Principles of Semiconductor Devices", Oxford: Oxford University Press, (2006).
- [20] Saga, T., "Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production", *NPG Asia Materials* 2,96-102, (2010).
- [21] Chopra, K. L., Paulson, P. D., Dutta, V., "Thin-film solar cells: an overview", *Progress in Photovoltaics*, 12, 69-92, (2004).
- [22] Imamzai, M., Aghaei, M., Thayoob, Y. H. M., Forouzanfar, M., "A Review on Comparison between Traditional Silicon Solar Cells and Thin- Film CdTe Solar Cells", in *Proceedings of National Graduate Conference (NatGrad 2012)*, Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya Campus, (2012).
- [23] Goswami, D. Y., Kreith, F., "Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy", Boca Raton: CRC Press, (2007).
- [24] Luque, A., Hegedus, S., "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering". 2nd Edition ed, Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, (2003).
- [25] Elsabawy, K. M., El-hawary, W. F., REFAT, M. S., "Advanced Synthesis of Titanium-Doped-Tellurium-Cadmium Mixtures for High Performance Solar Cell Applications as One of Renewable Source of Energy", *International Journal of Chemical Sciences*, 10, 1869-1879, (2012).
- [26] Badawy, W. A., "A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots", *Journal of Advanced Research*, 6, 123-132, (2015).
- [27] Sethi, V. K., Pandey, M., Shukla, P., "Use of Nanotechnology in Solar PV Cell", *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2, 77-80, (2011).
- [28] Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P., Qiu, Y., "Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 549-573, (2006).
- [29] Zhan, J., Sun, P., Jiang, S., Sun, X., "An investigation of the performance of dye-sensitized nanocrystalline solar cell with anthocyanin dye and ruthenium dye as the sensitizers", Roskilde University, (2006).
- [30] Graetzel, M., Janssen, R. A. J., Mitzi, D. B., Sargent, E. H., "Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics", *Nature*, 488, 304-312, (2012).
- [31] Nozik, A. J., "Nanoscience and Nanostructures for Photovoltaics and Solar Fuels", *NANO Letters*, 10, 2735-2741, (2010).
- [32] Suhaimi, S., Shahimin, M. M., Alahmed, Z. A., Chyský, J., Reshak, A. H., "Materials for Enhanced Dye-sensitized Solar Cell Performance: Electrochemical Application", *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 2859-2871, (2015).
- [33] Liang, M., Xu, W., Cai, F., Chen, P., Peng, B., Chen, J., Li, Z., "New Triphenylamine-Based Organic Dyes for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells", *The Journal of Physical Chemistry C*, 111, 4465-4472, (2007).
- [34] Nosaka, Y., "Solar Cells and Photocatalysts", *Materials Science and Materials Engineering*, 1, 571-605, (2011).
- [35] Grätzel, M., "Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164, 3-14, (2004).
- [36] Tributsch, H., "Dye sensitization solar cells: a critical assessment of the learning curve", *Coordination Chemistry Reviews*, 248, 1511-1530, (2004).
- [37] Tributsch, H., "Nanocomposite solar cells: the requirement and challenge of kinetic charge separation", *Journal of Solid State Electrochemistry*, 13, 1127-1140, (2009).
- [38] Tennakone, K., Kumara, G. R. R. A., Kumarasinghe, A. R., Wijayantha, K. G. U., Sirimanne, P. M., "A dye-sensitized nano-porous solid-state photovoltaic cell", *Semiconductor Science and Technology*, 10, 1689-1693, (1995).
- [39] Gorlov, M., Kloo, L., "Ionic liquid electrolytes for dye-sensitized solar cells", *Dalton Transactions*, 2008, 26655-26666, (2008).
- [40] Li, D., Wang, M., Wu, J., Zhang, Q., Luo, Y., Yu, Z., Meng, Q., Wu, Z., "Application of a New Cyclic Guanidinium Ionic Liquid on Dye-Sensitized Solar Cells (DSCs)", *Langmuir*, 25, 4808-4814, (2009).
- [41] Sayama, K., Sugihara, H., Arakawa, H., "Photoelectrochemical Properties of a Porous Nb₂O₅ Electrode Sensitized by a Ruthenium Dye", *Chemistry of Materials*, 10, 3825-3832, (1998).
- [42] Snaith, H. J., Schmidt-Mende, L., "Advances in Liquid-Electrolyte and Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells", *Advanced Materials*, 19, 3187-3200, (2007).
- [43] Mor, G. K., Varghese, O. K., Paulose, M., Shankar, K., Grimes, C. A., "A review on highly ordered, vertically oriented TiO₂ nanotube arrays: Fabrication, material properties, and solar energy applications", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 2011-2075, (2006).
- [44] Zhu, K., Neale, N. R., Miedaner, A., Frank, A. J., "Enhanced Charge-Collection Efficiencies and Light Scattering in Dye-Sensitized Solar Cells Using Oriented TiO₂ Nanotubes Arrays", *Nano Letters*, 7, 69-74, (2007).
- [45] Umeyama, T., Imahori, H., "Carbon nanotubemodified electrodes for solar energy conversion", *Energy & Environmental Science*, 1, 120-133, (2008).

- [46] Vogel, R., Pohl, K., Weller, H., "Sensitization of highly porous, polycrystalline titanium dioxide electrodes by quantum sized cadmium sulfide", *Chemical Physics Letters*, 174, 241-246, (1990).
- [47] Shen, Q., Kobayashi, J., Diguna, L. J., Toyoda, T., "Effect of ZnS coating on the photovoltaic properties of CdSe quantum dot-sensitized solar cells", *Journal of Applied Physics*, 103, 084304, (2008).
- [48] Tak, Y., Hong, S. J., Lee, J. S., Yong, K., "Solution-Based Synthesis of a CdS Nanoparticle/ZnO Nanowire Heterostructure Array", *Crystal Growth and Design*, 9, 2627-2632, (2009).
- [49] Leschkies, K. S., Divakar, R., Basu, J., Enache-Pommer, E., Boercker, J. E., Carter, C. B., Kortshagen, U. R., Norris, D. J., Aydil, E. S., "Photosensitization of ZnO Nanowires with CdSe Quantum Dots for Photovoltaic Devices", *NANO Letters*, 7, 17193-17198, (2007).
- [50] Hodes, G., "Comparison of Dye- and Semiconductor-Sensitized Porous Nanocrystalline Liquid Junction Solar Cells", *Journal of Physical Chemistry C*, 112, 177778-177787, (2008).
- [51] Zhang, J. Z., Noguez, C., "Plasmonic optical properties and applications of metal nanostructures", *Plasmonics*, 3, 127-150, (2008).
- [52] Sass, J. K., Sen, R. K., Meyer, E., Gerischer, H., "Effect of surface plasmon excitation on photoemission and photooxidation processes at a silver-electrolyte interface", *Surface Science*, 44, 515-528, (1974).
- [53] Tian, Y., Tatsuma, T., "Mechanisms and Applications of Plasmon-Induced Charge Separation at TiO₂ Films Loaded with Gold Nanoparticles", *Journal of the American Chemical Society*, 127, 7632-7637, (2005).
- [54] Sakai, N., Fujiwara, Y., Takahashi, Y., Prof. T. T., "Plasmon-Resonance-Based Generation of Cathodic Photocurrent at Electrodeposited Gold Nanoparticles Coated with TiO₂ Films", *ChemPhysChem*, 10, 766-769, (2009).
- [55] Furube, A., Du, L., Hara, K., Katoh, R., Tachiya, M., "Ultrafast Plasmon-Induced Electron Transfer from Gold Nanodots into TiO₂ Nanoparticles", *Journal of the American Chemical Society*, 129, 14852-14853, (2007).
- [56] Nozik, A. J., Thacker, B. R., Olson, J. M., "Quantization effects in the photoelectrochemistry of superlattice photoelectrodes", *Nature*, 316, 51-53, (1985).
- [57] Nozik, A. J., "Quantum dot solar cells", *Physica E*, 14, 115-120, (2002).
- [58] Luther, J. M., Law, M., Beard, M. C., Song, Q., Reese, M. O., Ellingson, R. J., Nozik, A. J., "Schottky Solar Cells Based on Colloidal Nanocrystal Films", *NANO Letters*, 8, 3488-3492, (2008).
- [59] Kameyama, T., Okazaki, K.I., Takagia, K., Torimoto, T., "Stacked-structure-dependent photoelectrochemical properties of CdS nanoparticle/layered double hydroxide (LDH) nanosheet multilayer films prepared by layer-by-layer accumulation", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 11, 5369-5376, (2009).
- [60] Ganesh, B. N. V. S., Supriya, Y. V., "Recent Advancements and Techniques in Manufacture of Solar Cells: Organic Solar Cells", *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 2, 565-573, (2013).
- [61] Janssen, R., "Introduction to polymer solar cells", Eindhoven University of Technology: Netherlands.
- [62] "A Century of Nobel Prize Recipients: Chemistry, Physics, and Medicine", Hoboken: CRC Press, (2003).
- [63] Mayer, A. C., Scully, S. R., Hardin, B. E., Rowell, M. W., McGehee, M. D., "Polymer-based solar cells", *Materials Today*, 10, 28-33, (2007).
- [64] Wudl, F., Srdanov, G., "Conducting polymer formed of poly(2-methoxy,5-(2'-ethyl-hexyloxy)-p-phenylenevinylene)", (1993).
- [65] Li, G., Zhu, R., Yang, Y., "Polymer solar cells", *NATURE PHOTONICS*, 6, 153-161, (2012).
- [66] Brabec, C. J., Shaheen, S. E., Winder, C., Sariciftci, N. S., Denk, P., "Effect of LiF/metal electrodes on the performance of plastic solar cells", *Applied Physics Letters*, 80, 1288, (2002).
- [67] Barnes, P. R. F., Anderson, A. Y., Koops, S. E., Durrant, J. R., O'Regan, B. C., "Electron Injection Efficiency and Diffusion Length in Dye-Sensitized Solar Cells Derived from Incident Photon Conversion Efficiency Measurements", *The Journal of Physical Chemistry C*, 113, 1126-1136, (2009).
- [68] Philipps, S. P., Bett, A. W., Horowitz, K., Kurtz, S., "Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology", Freiburg, (2016).
- [69] Ranjan, P., Patel, J., Bhuvra, J., Gandhi, M., "A Review on Solar Photovoltaics and Roof Top Application of It", *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 2349-2444, (2015).
- [70] Li, Y., Nie, D., Zhao, X., Li, Y., "Market structure and performance: An empirical study of the Chinese solar cell industry", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 78-82, (2017).
- [71] Płaczek-Popko, E., "Top PV market solar cells 2016", *Opto-Electronics Review*, 25, 55-64, (2017).
- [72] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Ho-Baillie, A. W. Y., "Solar cell efficiency tables (version 49)", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25, 3-13, (2017).
- [73] Du, J., Du, Z., Hu, J., Pan, Z., Shen, Q., Sun, J., Long, D., Dong, H., Sun, L., Zhong, X., Wan, L., "Zn-Cu-In-Se Quantum Dot Solar Cells with a Certified Power Conversion Efficiency of 11.6%", *Journal of the American Chemical Society*, 138, 4201-4209, (2016).
- [74] Seo, J., Noh, J. H., Seok, S. I., "Rational Strategies for Efficient Perovskite Solar Cells", *Accounts of Chemical Research*, 49, 562-572, (2016).