

بخش اول

مقدمه‌ای بر سلول خورشیدی



ندا عسکرزاده

کارشناسی ارشد الکتروسر امیک دانشگاه شیراز

ساجده عنابستانی

کارشناسی مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد



آرین شاهوردی

کارشناسی مهندسی مواد دانشگاه تهران

میرعلیرضا فغانی تولون

کارشناسی مهندسی مکانیک و مهندسی مواد دانشگاه تهران



کلیت و تعریف سلول خورشیدی

در این قسمت تاریخچه زمانی و پیشرفت‌های علمی در زمینه تکنولوژی سلول‌های خورشیدی از سال ۱۹۵۴ تا کنون مورد بررسی قرار می‌گیرد. دانشمندان و محققان علم مواد برخی نیمه هادی‌های III-V، نانوتکنولوژی و مواد آلی را شناسایی کرده‌اند که می‌توانند در طراحی و توسعه سلول‌های خورشیدی، که به عنوان سلول‌های فوتوولتائیک^۱ شناخته می‌شوند، به کار برده شوند. همچنین لازم است به این نکته اشاره کرد این سلول‌های PV نه تنها با محیط زیست سازگار می‌باشند بلکه کارآمدتر، قابل اطمینان‌تر و یک منبع نامحدود انرژی الکتریکی نیز به حساب می‌آیند، زیرا بر مبنای نور خورشید کار می‌کنند. حال سوالی که مطرح می‌شود این است که چرا در حال حاضر نیاز به تکنولوژی خورشید بسیار مهم شده است؟

Photovoltaic Cells (PV) ۱

افزایش قیمت نفت، حملات تروریستی به تاسیسات نفتی کشورها، هزینه‌های بالای انرژی، سیاست‌های نادرست کشورها، شرایط نامساعد آب و هوایی و همچنین اثر گلخانه‌ای، برنامه‌ریزان حوزه انرژی را مجبور کرده است که به دنبال منابع جایگزین انرژی بگردند؛ تا بدین منظور تکیه بر سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت و گاز کاهش یافته و این سوخت‌ها جای خود را به انرژی‌های پاک موجود در طبیعت بدهند و نهایتاً بتوانیم از سیاره‌ی خود محافظت کنیم. توجه داشته باشید که در اثر تولید الکتریسیته به کمک سوزاندن زغال سنگ، گاز و چوب، مقدار زیادی کربن دی اکسید منتشر می‌شود. علاوه بر این‌ها، زغال سنگ استخراج شده از معادن زغال سنگ باید پس از استخراج به نیروگاه‌های زغال سنگ منتقل شود که این امر مستلزم اعمال هزینه‌های زیاد حمل و نقل و افزایش احتمال تاخیر در رسیدن زغال سنگ تحت شرایط نامساعد آب و هوایی می‌باشد. از طرفی نیروگاه‌های هسته‌ای نیز بسیار هزینه بر بوده و مدت زمان ساخت آن‌ها بسیار طولانی است.

بنابر دلایل ذکر شده علاقه‌ی دانشمندان حوزه‌ی انرژی به منابع انرژی جایگزین مانند توربین‌های بادی، توربین‌های آبی و سلول‌های خورشیدی افزایش یافته است. ذکر این مسئله بسیار مهم است که تکنولوژی فوتوولتائیک (PV) مستقیم‌ترین روش برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی، بدون انتشار کربن دی اکسید و سایر گازهای گلخانه‌ای، می‌باشد.

انرژی خورشیدی براساس اثر فوتوولتائیک اولین بار در سال ۱۸۳۹ مشاهده شد. یک دستگاه PV شامل اتصال p-n مواد نیمه رسانا بوده که ولتاژ آن از طریق پرتوهای خورشیدی تامین می‌شود. ولتاژ تولیدی در محل برخورد پرتوی نور، به خواص نیمه رساناهای p و n و ثابت نفوذ آن ماده بستگی دارد؛ به عبارتی جذب نور خورشید از طریق نیمه رسانا صورت می‌گیرد. نیمه رساناهای مورد استفاده برای توسعه‌ی سلول‌های PV باید بتوانند بخش اعظمی از طیف خورشیدی را که به سطح سلول می‌رسد جذب کرده و در نتیجه‌ی آن راندمان مجموعه را افزایش دهند.



تاریخچه توسعه

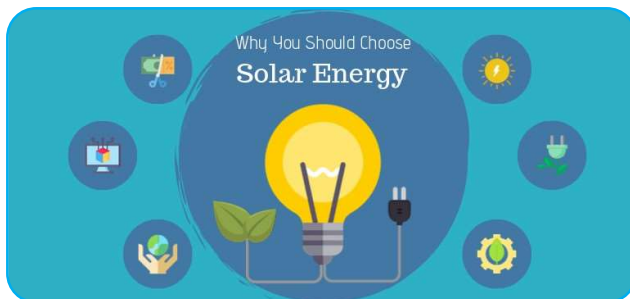
سلول‌های خورشیدی اولین بار به منظور تولید انرژی الکتریکی سفینه‌های فضایی و سیستم‌های ارتباطی ماهواره‌ای در اواخر دهه ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفتند؛ زیرا این دستگاه‌ها برای مدت زمان طولانی (حدوداً ۵ تا ۱۰ سال) به تعمیر و نگهداری نیازی نداشتند و علاوه بر آن بیشترین قابلیت اطمینان را بدون تغییر در میزان بازدهی در طول این مدت ارائه می‌دادند. اولین بار از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به منظور تولید انرژی الکتریکی در ماهواره‌ی ونگارد^۱ که در سال ۱۹۵۸ در مدار خود قرار گرفت استفاده شد. بعد از آن مکرراً در ماهواره‌ها از این سلول‌ها استفاده شد و بدین ترتیب کاربردهای فضایی برای بیش از دو دهه بازار اصلی این دسته از مواد قرار گرفت.

در سال ۱۹۷۳ دانشمندان حوزه انرژی دریافتند که اثر فوتوولتائیک می‌تواند در آینده‌ای نزدیک گزینه‌ی مناسبی به عنوان انرژی غیرفسیلی باشد.

فعالیت‌های تحقیقاتی بر روی سلول‌های PV نشان داد که اگر قرار است تکنولوژی سلول‌های خورشیدی به صورت بومی و یا تجاری گسترش پیدا کند باید هزینه‌های ناشی از توسعه و اجزاء سیستم کاهش یابد. در حال حاضر هزینه‌های سیستم ای نیرو در ایالات متحده، ژاپن و کشورهای اروپایی حدود ۱۰۰ برابر کاهش یافته است.

۱ Vanguard Satellite

چرا انرژی خورشیدی؟!



همواره تقاضای انرژی، نیروی محرکه‌ی اولیه برای توسعه توانایی‌های صنعتی بوده است. اختراع ماشین بخار موجب انقلاب صنعتی در جهان شد که نتیجه‌ی تکامل اقتصادی انرژی مبتنی بر چوب و زغال سنگ بود. بعد از آن رشد اقتصادی انرژی، با تمرکز بر منابع مختلف انرژی مانند انرژی هس‌های، باد، آب، نفت و گاز ادامه پیدا کرد. در این میان، انرژی هسته‌ای بسیار گران بوده و تشعشعات هسته‌ای و پسماندهای آن از مشکلات پیش‌رو

می‌باشد. انرژی الکتریکی که به وسیله‌ی سوزاندن زغال سنگ، چوب، گاز و نفت ایجاد می‌شود نیز مقادیر زیادی آلودگی به همراه داشته و کربن دی‌اکسید منتشر می‌کند، لذا موجب به خطر افتادن سلامتی انسان‌ها می‌شود.

تمامی این منابع انرژی به سرمایه گذاری‌های کلان و همچنین تعمیر و نگهداری برنامه ریزی شده و مرتب نیاز دارند. به عنوان مثال در مورد نیروگاه‌های زغال سنگ، سرمایه گذاری کلان اولیه، هزینه‌های حمل و نقل زغال سنگ و احتمال با تاخیر رسیدن زغال سنگ تحت شرایط نامساعد آب و هوایی می‌تواند مشکلات جدی ایجاد کند.

از سوی دیگر منبع انرژی خورشیدی عاری از آلودگی و قابل اطمینان بوده، به صورت رایگان در دسترس است، بدون سرو صدا است، قابل استفاده در دراز مدت می‌باشد، تعمیر و نگهداری آن رایگان است و در طول سال، عملکردی مداوم و نامحدود با اعمال هزینه‌های متوسط دارد.

اما با وجود تمام مزایای بیان شده برای سلول‌های خورشیدی و گذشت نزدیک به ۵۵ سال از اختراع آن‌ها، سلول‌های خورشیدی PV تنها ۰٫۰۴ درصد از انرژی الکتریکی جهان را تامین می‌کنند و علت آن هزینه‌های فراتر از حد توان مصرف کننده می‌باشد. براساس بررسی‌های آماری مصرف جهانی انرژی در سال ۲۰۰۷، ۳۰ درصد انرژی الکتریکی تولیدی به وسیله‌ی زغال سنگ، ۱۶ درصد آن به کمک گاز طبیعی، ۱۵ درصد آن به وسیله‌ی ژنراتورهای آبی، ۹ درصد آن به کمک نفت، ۴ درصد آن به کمک انرژی هسته‌ای و تنها ۱ درصد آن از طریق سلول‌های خورشیدی تامین می‌شود. در ایالات متحده انرژی خورشیدی از هر نوع آن، کمتر از ۰٫۱ درصد از تقاضای انرژی الکتریکی را برآورده می‌کند. با این حال تمامی کشورهای صنعتی مانند ایالات متحده، آلمان، ژاپن، برزیل، ایتالیا، اسپانیا و سایر کشورهای اروپایی در حال گسترش تولید انرژی الکتریکی به کمک سلول‌های خورشیدی می‌باشند. که در آمارهای اخیر سال ۲۰۱۹ ایالات متحده، ۱٫۸ درصد از کل مصرف انرژی الکتریکی از منبع خورشیدی بوده است.

خلاصه‌ای از فیزیک پایه سلول خورشیدی

شکاف نوار

الکترونی در آن سطوح انرژی وجود ندارد). به این سطوح انرژی، شکاف انرژی^۳ گفته می‌شود.

یک ماده می‌تواند شکاف‌های انرژی بسیاری داشته باشد، اما مهم‌ترین شکاف، شکاف نزدیک انرژی فرمی است که در آن تعداد حالت‌هایی که از الکترون اشغال شده اند، با توجه به تابع فرمی، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در واقع مهم‌ترین شکاف انرژی شکافی است که در دمای اتاق ترازهای انرژی پایین آن "تقریبا" پر از الکترون و ترازهای انرژی بالای آن "تقریبا" خالی از الکترون هستند.

به بالاترین ترازها نوار انرژی تقریبا پر نوار ظرفیت^۴ و به پایین‌ترین نوار انرژی تقریبا خالی نوار رسانش یا هدایت^۵ گفته می‌شود.

استفاده از مکانیک کوانتومی در فیزیک حالت جامد منجر به مدل فیزیکی شده است که شامل یک زنجیره از حالت‌هایی است که توسط الکترون‌ها قابل اشغال است. هر حالت دارای انرژی و بردار معین k (مومنتم کریستالی) است و به آن‌ها تراز انرژی گفته می‌شود. از آنجا که الکترون‌ها فرمیون^۱ هستند، هر یک از این حالت‌ها تنها با یک الکترون اشغال می‌شود. در دماهای بسیار کم، الکترون‌ها سطوحی با کمترین سطح انرژی ممکن را اشغال می‌کنند. در دمای کم (دمای اتاق، به عنوان مثال) توزیع الکترون‌ها در حالت‌های الکترونیکی بایک تابع فرمی^۲ شرح داده می‌شود که با افزایش انرژی، تعداد الکترون‌های موجود در آن سطح انرژی کاهش می‌یابد.

در این مدل سطوحی از انرژی وجود دارد که هیچ حالت الکترونیکی برای آنها وجود ندارد (یعنی هیچ Fermions^۱
Fermi Function^۲

۳ Band Gaps
۴ Valence Band
۵ Conduction Band



می‌توانند سطح انرژی و مومنتوم خود را عوض کنند یا در واقع می‌توانند به راحتی در این نوار انرژی حرکت کنند و باعث رسانش شوند. دلیل مات بودن رساناها نیز همین است به این صورت که هر فوتونی در ناحیه مری می‌تواند جذب شود و الکترون را به یکی از سطوح انرژی بالاتر ببرد حتی اگر انرژی آن خیلی کم باشد (طول موج آن بلند باشد).

نیمه رساناها؛ نیمه رساناها موادی با خواصی

بینابین دو گروه قبلی هستند. در نیمه رساناها نوار ظرفیت تقریباً پر و نوار رسانش تقریباً خالی است، زیرا شکاف انرژی دارای عرضی به اندازه تنها چند الکترون ولت (کمتر از شکاف انرژی در عایدها) یا حتی کمتر از ۱ الکترون ولت است. اولین پیامد شکاف انرژی باریک، مقداری هدایت الکتریکی است، زیرا برانگیختگی حرارتی در دمای اتاق نیز باعث انتقال تعداد کمی الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌شود و جمعیتی متناسب از حفره‌ها را در نوار ظرفیت به جای می‌گذارد (حفره به خاطر عدم وجود الکترون، در نوار ظرفیت، به وجود می‌آید). یک میدان الکتریکی اعمالی منجر به تنظیم مجدد جمعیت الکترون‌ها و حفره‌ها در نیمه رسانا می‌شود که جریان الکتریکی را در میدان خارجی به وجود می‌آورد. با این حال توجه داشته باشید که میزان جریان تولیدی توسط نیمه رساناها مختلف تفاوت زیادی دارد، که عمدتاً به دلیل تفاوت در پهنای شکاف انرژی و تفاوت متعاقب آن در جمعیت الکترون‌ها در نوار رسانش و حفره‌ها در نوار ظرفیت است. نتیجه دیگر این است که فوتون‌ها با انرژی متوسط (به عنوان مثال در ناحیه طیفی قابل مشاهده) می‌توانند باعث انتقال الکترون بین نوارها شوند.

بنابراین، نیمه هاد ها (حداقل آنهایی که شکاف نوار انرژی باریکی دارند) مات و تیره به نظر می‌رسند و فقط می‌توانند نور مادون قرمز را عبور دهند. یکی دیگر از نکات تعیین کننده میزان جذب نور در نیمه رسانا و میزان تولید الکترون-حفره نوارمستقیم یا غیرمستقیم بودن شکاف انرژی است.

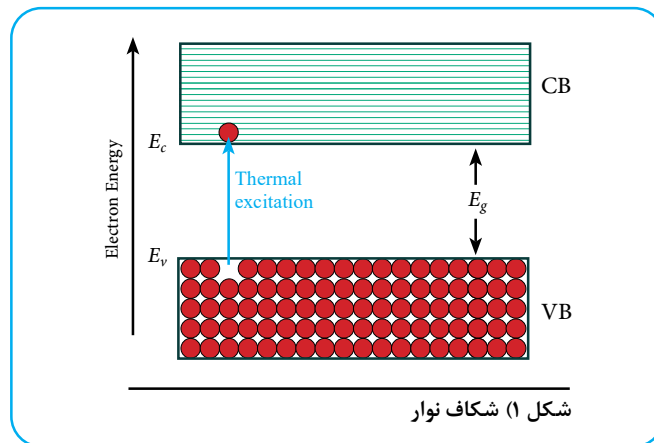
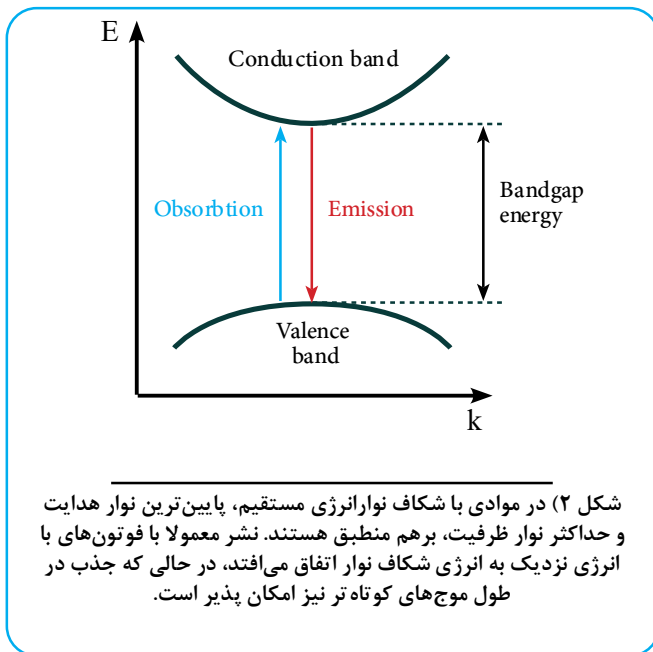
الکترون‌ها می‌توانند با جذب انرژی به صورت نور یا گرما از نوار ظرفیت وارد نوار رسانش شوند. به همین دلیل است که در دمای اتاق نوارهای رسانش و ظرفیت، به ترتیب، "تقریباً خالی" و "تقریباً پر" هستند. البته تعداد الکترون‌هایی که از نوار ظرفیت وارد نوار رسانش می‌شوند به پهنای شکاف انرژی نیز بستگی دارد، بدین صورت که در یک دمای ثابت هر چه پهنای شکاف انرژی افزایش یابد، الکترون‌های کمتری می‌توانند از آن عبور کنند و از نوار ظرفیت وارد نوار رسانش شوند.

ماده‌های ساختارهای الکترونیک متناوب

خواص الکتریکی و نوری یک ماده وابستگی شدیدی به ساختار الکترونیکی آن دارد:

دی الکترونیک در بعضی مواد، شکاف انرژی بسیار بزرگ است (با پهنای مثلاً بالاتر از ۴ الکترون ولت)، به طوری که در دمای اتاق تمام نوارها (ترازهای انرژی) زیر شکاف انرژی کاملاً پر و تمام نوارهای انرژی بالاتر از آن کاملاً خالی هستند. اینگونه مواد، دی الکتریک یا عایق نامیده می‌شوند. آنها عایق هستند، اساساً به این دلیل است که الکترون‌ها انرژی کافی برای عبور از شکاف انرژی و رفتن از نوار ظرفیت به نوار رسانش را ندارند. علاوه بر این، دی الکتریک‌ها به طور کلی نمی‌توانند نور مرئی یا مادون قرمز را جذب کنند، زیرا انرژی این فوتون‌ها برای انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش کافی نیست. در این مواد، فقط در ناحیه ماوراء بنفش و طول موج‌های کمتر، انرژی فوتون‌های نور برای انتقال‌های بین نواری کافی است که باعث جذب فوتون‌ها و انتقال الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌شود.

نیمه رساناها نقطه‌ی مقابل دی الکتریک‌ها، رساناها هستند. در این مواد بین نوار رسانش و نوار ظرفیت شکاف انرژی وجود ندارد و این دو نوار در هم تنیده هستند. در واقع در این مواد، بالاترین نوار انرژی به صورت کامل از الکترون پر نشده است، بنابراین الکترون‌ها با کمترین انرژی (نوری، حرارتی و غیره)



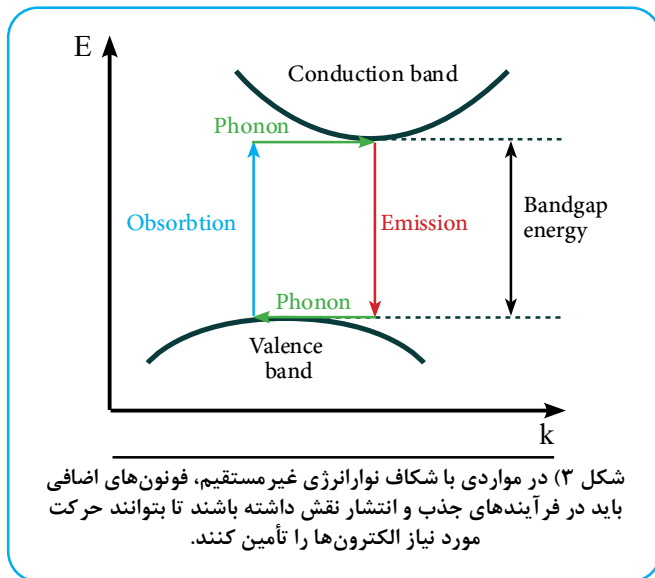
شکاف انرژی مستقیم شکاف انرژی مستقیم، شکاف انرژی است که بردار k (نه تنها بزرگی آن، بلکه جهت آن) در بالاترین نقطه نوار ظرفیت همانند پایین ترین نقطه در نوار هدایت است. این مطلب مرتبط با انتقال نوری می‌باشد. اینها فقط تغییر جزئی از مقدار بردار k را شامل می‌شود، زیرا طول موج نوری بسیار طولانی‌تر از مسافت ای میان اتمی یا دوره شبکه است. در صورت وجود شکاف نوار مستقیم، انتقال نوری به محض اینکه انرژی فوتون از انرژی شکاف نوار فراتر رود امکان پذیر است. چنین فرآیندی یک الکترون را از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته می‌کند در حالی که حفره‌ای (جای خالی الکترون) در نوار ظرفیت به جای می‌گذارد. چگالی حالت‌های اولیه و نهایی به طور معمول فقط در انرژی شکاف نوار بسیار کم است، اما ضریب جذب به سبب افزایش انرژی فوتون به سرعت افزایش می‌یابد. جایی بالاتر از انرژی شکاف نوار، طول جذب می‌تواند به مقیاس میکرومتر کاهش یابد.

بنابراین، طول نفوذ حامل بار (مسافت متوسطی که هر الکترون و یا هر حفره قبل از باز ترکیب بایکدیگر یعنی بازگشت آن الکترون به آن حفره می‌پیمایند) و زمان آن (زمان نفوذ حامل بار) معمولاً کم است، به عنوان مثال در حدود چند نانوثانیه، حتی اگر ساختار بلوری از کیفیت بالایی برخوردار باشد (با چگالی نقص کم).

نمونه‌هایی از مواد نیمه رسانای با شکاف مستقیم عبارتند از: گالیوم آرسنید (GaAs)، گالیوم آرسنید ایندیم (InGaAs)، نیتريد گالیوم (GaN)، نیتريد آلومینیوم (AlN)، سولفید کادمیوم (CdS)، سلنید کادمیوم (CdSe)، تلورید کادمیوم (CdTe)، سولفید روی (ZnS)، سولفید سرب (PbS) و سلنید سرب (PbSe).

شکاف انرژی غیرمستقیم در صورت وجود شکاف نوار انرژی غیرمستقیم، بردار k در پایین ترین نقطه نوار هدایت تفاوت قابل ملاحظه‌ای با بردار k در بالاترین نقطه در نوار ظرفیت دارد. در نتیجه، مانع از انجام فرآیندهای جذب نوار توسط فوتون تنها می‌شود زیرا فوتون مومنتوم (k) ناچیزی دارد که نمی‌تواند الکترون را به پایین ترین نقطه نوار هدایت برساند. به عبارت دیگر، نمی‌توان به طور همزمان اصل

به طور مشابه، فرایندهای انتشار مربوط به انتقال از نوار هدایت به نوار ظرفیت به راحتی امکان پذیر است، زیرا هر الکترون موجود در نوار هدایت (که معمولاً یکی از پایین ترین سطوح آنجا را اشغال می‌کند) می‌تواند حفره‌ای در نوار ظرفیت پیدا کند که دارای k بسیار مشابه باشد زیرا حفره‌ها به طور طبیعی در بالای نوار ظرفیت ایجاد می‌شوند.



سلول‌های خورشیدی همچنین می‌توانند تنها نور با انرژی فوتون بالای شکاف نوار را استفاده کنند. بنابراین، از نور خورشید با طول موج بلند (انرژی پایین) نمی‌توان استفاده کرد. در حالی که این مشکل با استفاده از یک ماده با شکاف نوار انرژی بسیار کم قابل حل است، اما نتیجه آن یک ولتاژ عملی کم، یعنی خروجی انرژی کم خواهد بود. بنابراین شکاف نوار انرژی باید براساس تعادل بین جذب کارآمد نور خورشید (مطلوبیت بالاتر شکاف انرژی باری تر) نوار و خروجی ولتاژ بالا (مطلوبیت بالاتر شکاف انرژی پهن تر) انتخاب شود.

بقای انرژی و اصل بقای مومنتوم را تنها توسط یک فوتون تحقق بخشید. بنابراین برای انتقال الکترون در نیمه‌رساناهای با شکاف انرژی غیرمستقیم، علاوه بر فوتون به فونون هم نیاز است که اصل بقای مومنتوم را ارضا نماید (فونون دارای انرژی ناچیز و مومنتوم زیاد است). چنین فرآیندهایی امکان پذیر هستند، اما با سرعت بسیار کمتری اتفاق می‌افتند. بنابراین، ضریب جذب^۱ نور بسیار کاهش می‌یابد.

همچنین، وابستگی ضریب جذب به طول موج در نزدیکی شکاف نوار، ضعیف‌تر است. ضریب جذب نور در این حالت نیز به میزان قابل توجهی وابسته به دما است، زیرا درجه حرارت بر جمعیت فونون‌ها نیز تأثیر می‌گذارد. با این حال، با افزایش انرژی فوتون‌ها، انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش بدون کمک فونون‌ها امکان پذیر می‌شود. در این حالت، ضریب جذب نور شدیداً افزایش می‌یابد.

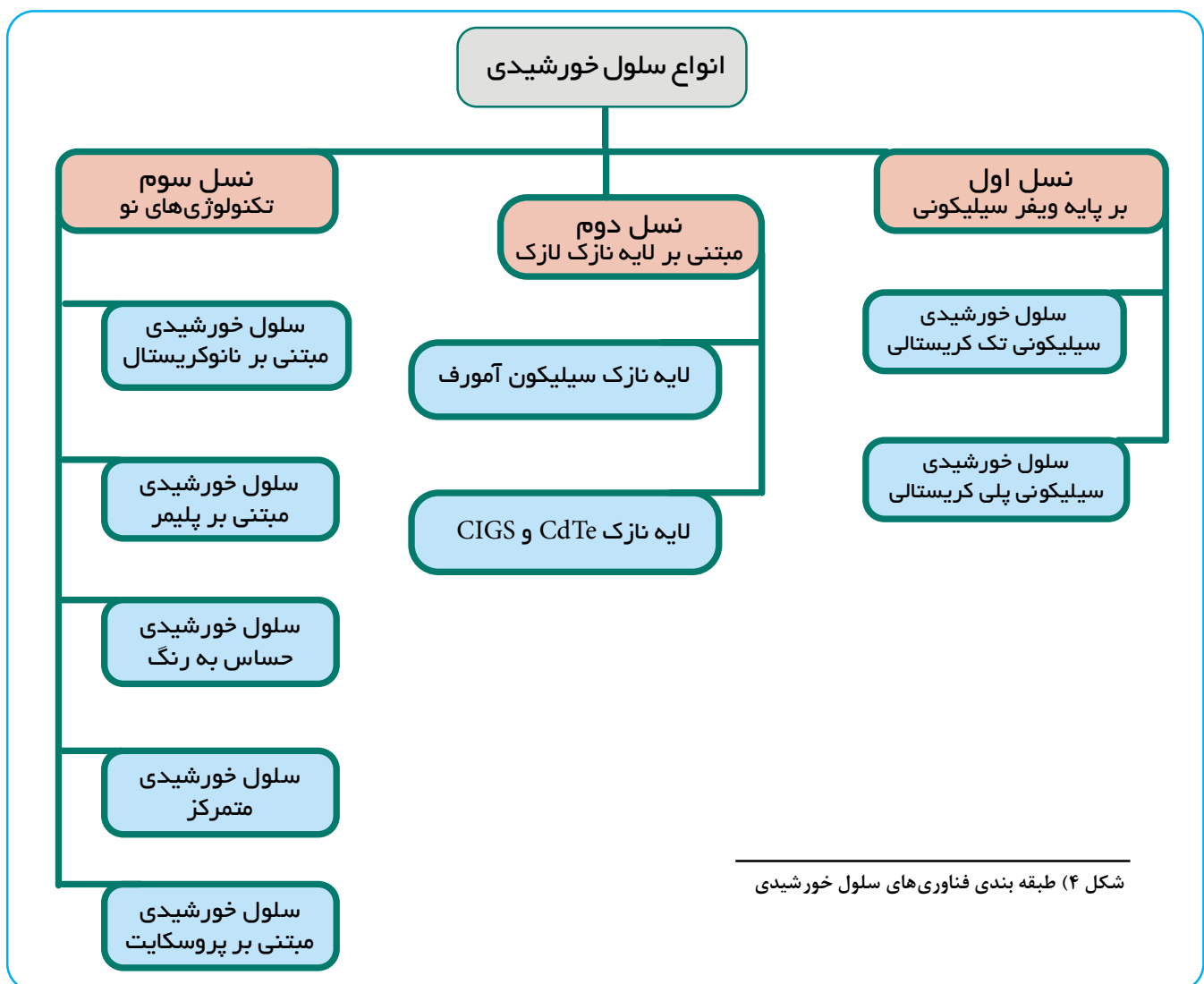
به همین ترتیب، فرآیندهای مربوط به بازترکیب الکترون-حفره سخت‌تر می‌شوند، مطابق با این واقعیت که یک حامل در نوار هدایت به سختی می‌تواند حفره‌ی با بردار k مناسب پیدا کند. بنابراین، فرآیندهای نشر فقط با درگیر شدن نشر فونون امکان پذیر است.

نمونه‌هایی از مواد نیمه رسانا شکاف نوار غیرمستقیم عبارتند از سیلیکون (Si)، ژرمانیوم (Ge)، آرسنید آلومینیوم (AlAs) و فسفید گالیوم (GaP).

به عنوان مثال، به دلیل کاهش ضرایب جذب، لایه‌های سیلیکون در فوتودودها و سلول‌های خورشیدی نیاز به ضخیم‌تر شدن دارند (غالباً صدها میکرومتر به جای چند میکرومتر). برای سلول‌های خورشیدی لایه نازک، باید از مواد شکاف مستقیم نوار استفاده شود (مثلاً تلورید کادمیوم). همچنین، سیلیکون برای دیودهای ساطع کننده نور^۲ اساساً نامناسب است. به طور کلی، شکاف نوار غیرمستقیم اغلب یک چالش برای ادوات نوری مبتنی بر سیلیکون است.

انواع سلول خورشیدی

انواع مختلفی از سلول‌های خورشیدی وجود دارد. سلول‌های سیلیکونی مبتنی بر Wafer، ۹۰٪ از سلول‌های خورشیدی را تشکیل می‌دهند. ضخامت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی مبتنی بر Wafer تقریباً ۱۸۰-۲۰۰ میکرومتر است. انواع عمده‌ای از مواد سیلیکونی مورد نیاز برای تولید سلول‌های خورشیدی تک کریستالی، چند کریستالی و آمورف سیلیکون، کادمیوم - تلورید، مس-ایندیوم-گالیم-سلنید و مس-ایندیوم-گالیم-سولفید است. طبقه بندی فناوری‌های سلول خورشیدی در زیر نشان داده شده است.

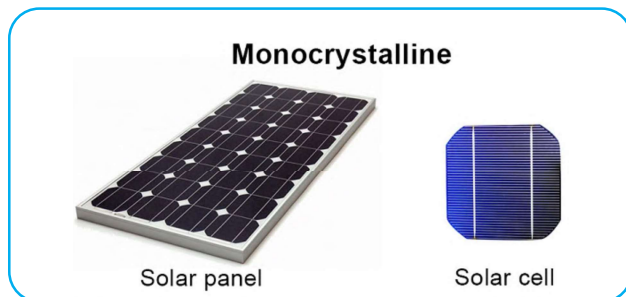


سلول های خورشیدی نسل اول

ویفر سیلیکون برای تولید سلول خورشیدی نسل اول مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به راندمان بالای انرژی این فناوری قدیمی ترین اما محبوب ترین فناوری است. سلول های خورشیدی نسل اول بیشتر به ۲ زیر گروه طبقه بندی می شوند:

۱. سلول خورشیدی سیلیکونی منفرد / تک کریستالی.

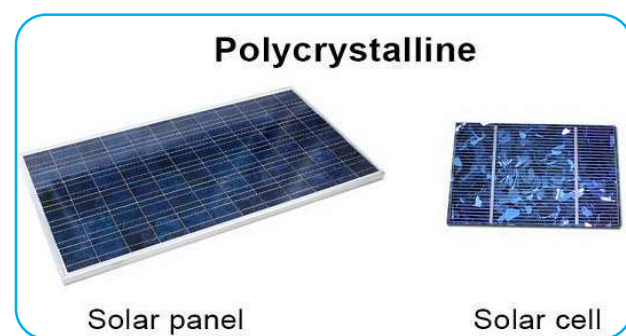
سلول خورشیدی سیلیکونی منفرد / تک کریستالی



۲. سلول خورشیدی سیلیکون پلی / چند کریستالی.

فرآیند Czochralski برای ساخت سلول خورشیدی تک کریستالی استفاده می شود. در طی این فرآیند، بلورهای Si از شمش های اندازه بزرگ بریده می شوند. هزینه تولید تک کریستال بزرگ که به آن فرآیند "بلور مجدد" می گویند، بیشتر است. اگرچه کارایی سلول های خورشیدی یکپارچه سیلیکونی بین ۱۴ تا ۱۸ درصد است، اما شرکت پیشرو SunPower Corporation (۲۰۱۵) ماژول هایی با بازده ۲۰.۴ درصد تولید کرده است که توسط NREL (۲۰۱۵) اندازه گیری شده است.

سلول خورشیدی سیلیکونی پلی کریستالی



بر خلاف سلول سیلیکونی تک کریستال که از یک کریستال با جهت گیری مشخص و بدون مرز دانه تشکیل شده اند، سلول های پلی کریستال از تعداد زیادی دانه در جهات مختلف کریستالی که توسط مرز دانه از هم متمایز می شوند، تشکیل شده اند. فرآیند ساخت این نوع سلول خورشیدی با خنک کردن قالب پر از گرافیت انجام می شود که آن را اقتصاد تر می کند. این سلول ها در حال حاضر محبوب ترین نوع سلول های خورشیدی هستند. اگرچه این سلول ها ارزان تر هستند، اما بازدهی آنها به حدود ۱۲ تا ۱۴ درصد رسیده است. تأثیر دما بر کارایی سلول خورشیدی پلی کریستالی در جدول ۱ نشان داده شده است.

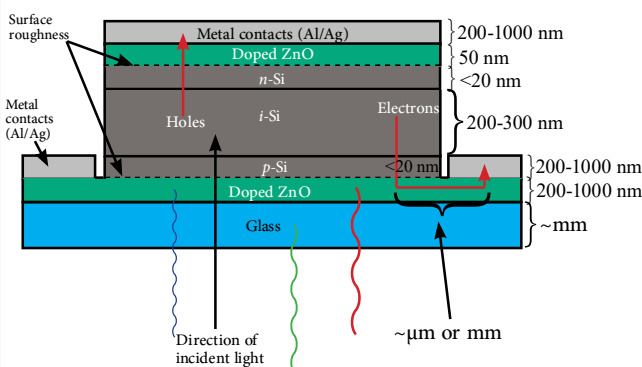
بازده (درصد)	دما (درجه سلسیوس)
۱۴	۸۱
۱۹	۸۳
۲۷	۸۵
۲۱	۸۷
۱۵	۸۹

جدول ۱) تأثیر افزایش دما در بازده سلول های خورشیدی کریستالی Si

سلول های خورشیدی نسل دوم

این دسته بر اساس فناوری های لایه نازک PV ساخته شده اند و شامل سه خانواده اصلی است: سیلیکون آمورف (a-Si) و میکروآمورف (a-Si / $\mu\text{c-Si}$)، کادمیوم-تلورید (CdTe)، مس - ایندیوم - گالیم - سلنید CIGS. سلول ای خورشیدی نسل دوم نسبت به سلول ای خورشیدی Wafer سیلیکون نسل اول اقتصادی تر هستند. لایه های جاذب نور سلول های خورشیدی نسل اول و سلول های خورشیدی لایه نازک به ترتیب دارای ۳۵۰ میکرومتر و ضخامت ۱ میکرومتر هستند. این نوع سلول خورشیدی دارای شکاف نوار ۱,۴۵ ولت است که توسط بارنت و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. (۲۰۰۱) در صورت وجود سلول های خورشیدی سیلیکونی پلی کریستالی لایه نازک به دلیل به دام افتادن نور و غیرفعال شدن سطح پشت، می توان بازده تبدیل انرژی را بیش از ۱۹٪ بدست آورد. بسیاری از فناوری های PV لایه نازک موجود توسط Powalla و Dimmler (۲۰۰۱) به ویژه فناوری مبتنی بر Cu (In,Ga) Se_2 (CIGS) مورد بررسی قرار گرفت.

سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکون آمورف (a-Si)



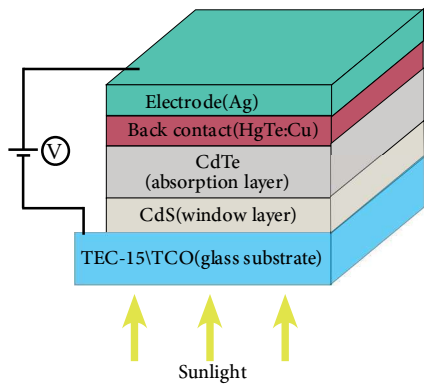
شکل ۵ شماتیکی از سلول خورشیدی سیلیکون آمورف

این سلول ها می توانند در دمای کم تهیه شوند. بنابراین از پلیمر کم هزینه و سایر زیرلایه های انعطاف پذیر استفاده می کنند. در طول فرآیند ساخت قسمت پشتی زیرلایه توسط سیلیکون دوپ شده پوشانده می شود. این نوع سلول های خورشیدی دارای رنگ قهوه ای تیره در سمت بازتاب هستند و رنگ نقره ای آن در طرف رسانا است. بازدهی ناپایدار محدودیت اصلی این سلول ها است. شکل ۵ شماتیک سلول خورشیدی آمورف سیلیکون را نشان می دهد. بیشتر شرکت ها در حال تولید این نوع ماژول ها از محدوده ۵,۹-۹٪ هستند اما شرکت Stion of USA ماژول های a-Si را با بالاترین بازده ۱۳,۸٪ تولید می کند.

سلول خورشیدی فیلم نازک کادمیوم تلورید (CdTe)

از نظر اقتصادی، تلورید کادمیوم (CdTe) یکی از انواع مهم در بین سلول های خورشیدی لایه نازک است که ارزان تر است و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. اتصال p-n دیود بین لایه های سولفید کادمیوم تشکیل می شود.

فرآیند تولید به این شرح است: اولاً سلول ای خورشیدی مبتنی بر CdTe از مواد پلی کریستالی ساخته می شوند و شیشه به عنوان زیرلایه انتخاب می شود. دوماً، رسوب با استفاده از روش های مختلف اقتصادی انجام می شود و چندین لایه متعددی سلول خورشیدی CdTe روی زیرلایه پوشانده می شود. راندمان آن معمولاً بین ۹/۵ تا ۱۱ درصد است. اما به دلیل سمی بودن کادمیوم که می تواند در بدن انسان، حیوانات و گیاهان جمع شود، مشکلات زیست محیطی زیادی ایجاد می کند. بازیافت بیشتر و دفع Cd سمی نیز به محیط زیست آسیب می رساند.

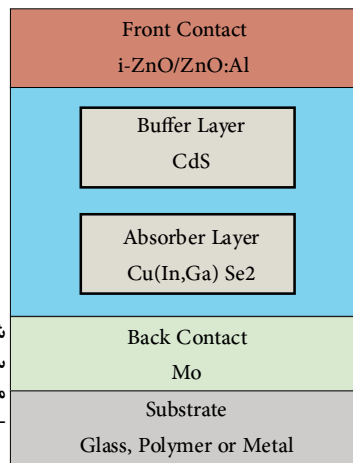


شکل ۶ شماتیک سلول خورشیدی کادمیوم تلورید

برت و فریدیدز (۱۹۹۳)، آراموتو و همکاران. (۱۹۹۷) و وو و همکاران. (۲۰۰۱) راندمان سلول‌های خورشیدی CdTe را حدود ۱۵٪ تا ۱۶٪ بدست آورند.

بالاترین راندمان سلول خورشیدی CdTe با ۱۷٫۳٪ توسط شرکت First Solar (۲۰۱۱) حاصل می‌شود که توسط NREL تأیید شد. شماتیک سلول خورشیدی کادمیوم تلورید در شکل ۶ نشان داده شده است.

سلول خورشیدی فیلم نازک کادمیوم تلورید (CdTe)



شکل ۷ شماتیک سلول خورشیدی مس - ایندیم - گالیم - سلنید - CIGS

این نیمه هادی از چهار عنصر مس، ایندیم، گالیم و سلنیوم تشکیل شده است. بازدهی CIGS به بازه حدود ۱۰-۱۲ درصد دست یافته است. فناوری مبتنی بر سلول خورشیدی CIGS به دلیل کارایی بالایی از فناوری‌های لایه نازک را تشکیل می‌دهد. لایه نشانی CIGS با روش‌های زیر انجام می‌شود: کندوپاش، تبخیر، تکنیک پوشش الکتروشیمیایی، چاپ و رسوب پرتو الکترونی. مضر نبودن برای طبیعت و طولانی بودن عمر از مزایای مهم فناوری سلول‌های خورشیدی CIGS است. تأثیر افزایش دما بر کارایی سلول‌های خورشیدی CIGS در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۷ سلول خورشیدی CIGS را نشان می‌دهد.

بازده (درصد)	دما (درجه سلسیوس)
۱۹٫۷۱	۲۵
۱۹٫۳۰	۳۰
۱۸٫۹۰	۳۵
۱۸٫۵۱	۴۰
۱۸٫۲۱	۴۵
۱۷٫۷۴	۵۰
۱۷٫۳۶	۵۵
۱۶٫۹۸	۶۰
۱۶٫۶۰	۶۵
۱۶٫۲۲	۷۰

جدول ۲ تأثیر افزایش دما بر راندمان سلول‌های خورشیدی مس - ایندیم - گالیم - سلنید - CIGS

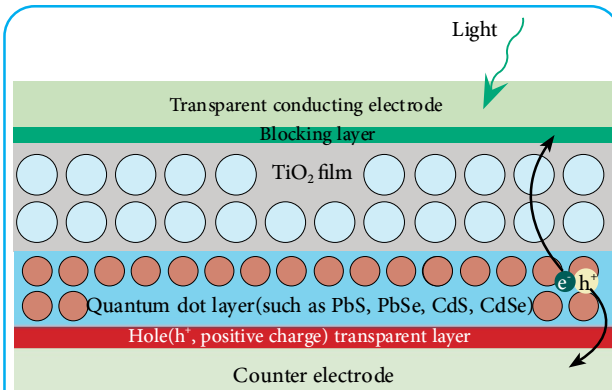
۱ sputtering

سلول های خورشیدی نسل سوم

این دسته شامل فناوری هایی هستند که به دلیل پتانسیل هایشان هنوز هم به تحقیقات زیادی نیاز دارند. انواع سلول های خورشیدی نسل ۳ توسعه یافته عبارتند از:

۱. سلول های خورشیدی مبتنی بر نانو کریستال
۲. سلول های خورشیدی مبتنی بر پلیمر
۳. سلول های خورشیدی حساس به رنگ
۴. سلول های خورشیدی متمرکز

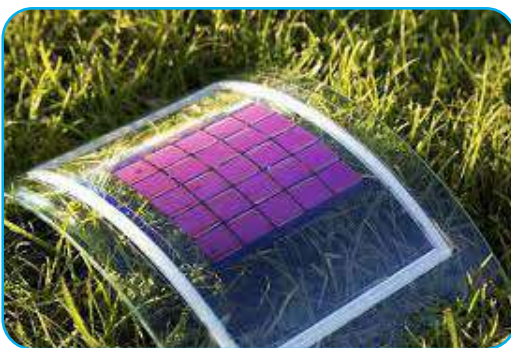
سلول های خورشیدی مبتنی بر نانو کریستال



شکل ۸) یک طرح کلی از عملکرد Quantum Dots

این سلول های خورشیدی به سلول های خورشیدی نقاط کوانتومی (Quantum Dots (QD هم معروف هستند. نقاط کوانتومی نانو ذرات نیمه هادی با اندازه کمتر از ۱۰ نانومتر هستند که در آنها کوانتیزه شدن خواص با اندازه اتفاق می افتد. ترکیب عمده سلول های خورشیدی QD نیمه رسانا از گروه انتقالی (برای مثال III-V) است. اندازه نانو کریستال ها در حدود چند نانومتر متغیر است. شکل ۸ ساختار سلول های خورشیدی QD را نشان می دهد.

سلول های خورشیدی مبتنی بر پلیمر



این سلول ها به دلیل زیرلایه پلیمری که دارند از انواع انعطاف پذیر سلول های خورشیدی هستند. سلول های خورشیدی پلیمری از لایه های عملکردی نازک پی در پی پلیمری تشکیل شده است.

محققان به بازدهی بیش از ۷ الی ۱۰ درصد برای سلول های خورشیدی پلیمری دست یافته اند.

سلول های خورشیدی حساس به رنگ

بازده (درصد)	دما (درجه سلسیوس)
۸۰-۷۵	۳۰
۷۱-۶۷	۴۰
۶۷-۶۵	۵۰
۶۷-۶۳	۶۰
۶۳-۵۹	۷۰
۵۹-۵۸	۸۰

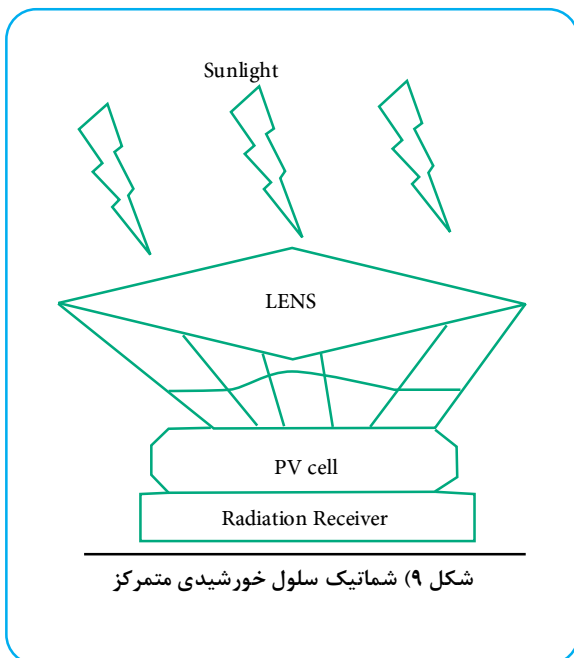
جدول ۳) تأثیر افزایش دما بر بازده سلول های خورشیدی حساس به رنگ

اولین سلول ای حساس به رنگ یا DSSC^۱ در موسسه پلی تکنیک فدرال لوزان سوئیس معرفی شده است. این سلول ها از چهار مؤلفه تشکیل شده است: الکتروود نیمه هادی، جاذب رنگدانه، الکتروولیت و الکتروود مخالف^۲ (کربن یا پلاتین). روش های ساده فرآیند مانند تکنیک های چاپ، انعطاف پذیری، شفافیت و هزینه کم، DSSC را جذاب می کند. مسائل مربوط به پایداری DSSC از چالش های این نوع سلول ها است. تأثیر افزایش دما بر کارایی سلول های خورشیدی DSSC در جدول ۳ نشان داده شده است.

^۱ Dye-sensitized solar cell

^۲ Counter electrode

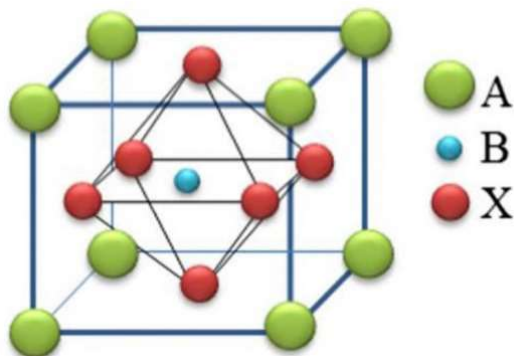
سلول های خورشیدی متمرکز



شکل ۹) شماتیک سلول خورشیدی متمرکز

سلول های خورشیدی متمرکز نوع جدیدی از فناوری توسعه یافته هستند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، جمع آوری مقدار زیادی انرژی خورشیدی و متمرکز کردن این انرژی بر روی ناحیه کوچک، اصل سلول ای خورشیدی متمرکز است. از این رو این فناوری توسعه یافته از آینه ها و لنزهای بزرگ برای تمرکز انرژی خورشیدی استفاده می کند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، تمرکز مقدار زیادی از نور خورشید، مقدار زیادی از انرژی گرما را تولید می کند.

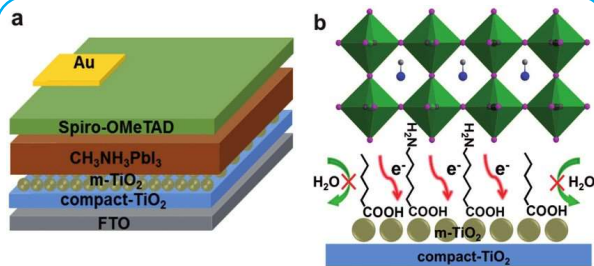
فن آوری در حال ظهور: سلول خورشیدی مبتنی بر پروسکایت



شکل ۱۰) ساختار کریستالی پروسکایت اور توگونال

سلول های خورشیدی پروسکایت (Perovskite)

یک گروه از سلول ای خورشیدی هستند که به تازگی توسعه یافته اند و در مقایسه با سلول های خورشیدی فیلم نازک و سیلیکون دارای چندین مزیت هستند. پروسکایت طبقه ای از ترکیبات با فرمول شیمیایی ABX_3 است که در آن X یک آنیون (در سلول های خورشیدی پروسکایت یک هالوژن مانند I, Br, Cl) و A و B کاتیون هایی با اندازه های مختلف را نشان می دهد. شکل ۱۰ ساختار کریستالی مواد پروسکایت را نشان می دهد. در سال (۲۰۱۵) سلول ای خورشیدی پروسکایتی که دارای بازده تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی ۹/۹ درصد هستند گزارش شد. در سال (۲۰۱۶) تجزیه و نتایج تحقیقاتی نشان داد که هنگامی که درجه حرارت از -۸۰ درجه سانتیگراد به ۸۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد عملکرد تا ۲۵٪ کاهش می یابد. با توجه به تخریب مواد مورد استفاده در این سلول، راندمان کاهش می یابد. تأثیر افزایش دما در بازده این نوع سلول خورشیدی در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۱) شماتیکی از ساختار (a) و عملکرد (b) سلول های خورشیدی پروسکایتی

بازده (درصد)	دما (درجه سلسیوس)
۹-۱۰	۳۰
۹-۱۰	۳۵
۸-۹	۴۰
۸-۹	۴۵
۸-۹	۵۰
۷-۸	۵۵
۸-۹	۶۰
۷-۸	۶۵
۶-۷	۷۰
۵-۶	۸۰

جدول ۵) تأثیرگذاری دما بر راندمان سلول های خورشیدی Perovskite



در این بخش تلاش شد تا مقدمه‌ای بر سلول خورشیدی، صفحات خورشیدی و همچنین لزوم توجه به تامین انرژی پاک بیان شود. همچنین تاریخچه‌ای مختصر از سلول خورشیدی نیز ارائه گردید. در ادامه نیز سعی شد مبانی و اصول فیزیکی سلول خورشیدی به زبان ساده بیان شود و در نهایت انواع سلول خورشیدی و نسل‌های س - انه آن معرفی گردید. ضمن تشکر از شما برای مطالعه مطالب، از شما دعوت می‌کنیم نظرات، انتقادات و پیشنهادات خود را با ما درمیان بذارید.



   @FarasoyeMavadUT

 WWW.FarasoyeMavadsj.ut.ac.ir

