

مروری بر نسل جدید سلول های خورشیدی: سلول های خورشیدی پرواسکایت و سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی

منصور نادری نیا، زهرا اعلایی ورنوسفادرانی*

دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

چکیده

در نسل سوم سلول های خورشیدی، محلول مواد آلی و غیر آلی پرواسکایت توجه زیادی را به عنوان یک محصول سبک برای سلول های خورشیدی به خود جلب کرده است. برخلاف صفحات سیلیکونی، صفحات پرواسکایت را می توان با مصرف انرژی کم، بدون نیاز به تجهیزات پیچیده و تنها در چند مرحله تولید کرد. همچنین در سال های اخیر سلول های خورشیدی نقطه کوانتومی کلئیدی پتانسیل بالایی برای تبدیل شدن به یک منبع انرژی کارآمد و سبک برای دستگاه های الکترونیکی دارند. برای دستیابی به سلول های خورشیدی انعطاف پذیر و پربازده نقاط کوانتومی کلئیدی، لایه انتقال الکترون که الکترون ها را از لایه جامد نقاط کوانتومی کلئیدی استخراج می کند، باید در دمای پایین پردازش شود و همچنین باز ترکیب بین لایه ها باید از بین برود. استفاده از نقاط کوانتومی در طراحی و ساخت سلول های خورشیدی موجب بازدهی بالا، هزینه کم، پایداری بالا، پردازش پذیری و سازگاری و انعطاف پذیری این سلول ها با محیط زیست می شوند؛ برای توسعه افزاره های خورشیدی با عملکرد بالا، مسائل زیادی وجود دارند که احتیاج به عنوان کردن بر مبنای تجاری سازی سلول های خورشیدی پرواسکایت هست. در این مقاله پیشرفت های مختلفی در زمینه سلول های خورشیدی پرواسکایت و سلول های خورشیدی نقطه کوانتومی مرور شده است و چالش های مختلف و خواص سلول های خورشیدی پرواسکایت و سلول های خورشیدی نقطه کوانتومی بررسی شده است.

واژه های کلیدی: سلول خورشیدی نسل سوم، پرواسکایت، نقاط کوانتومی

ایمیل نویسنده مسئول: alaie.zahra@yahoo.com

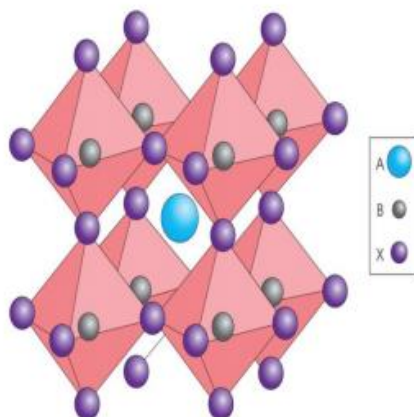
۱-مقدمه

در دهه اخیر سلول های خورشیدی پرواسکایت و سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. در این سلول ها نقاط کوانتومی و مواد پرواسکایت به عنوان جاذب نور خورشید عمل می کنند و جفت الکترون/حفره در آنها تولید می کنند. جذب نور بالا مواد پرواسکایت و نقاط کوانتومی موجب افزایش بازده در نسل سوم سلول های خورشیدی می شود.

اولین سلول خورشیدی سیلیکونی توسط آزمایشگاه بل در سال ۱۹۵۳ در آمریکا ساخته شد. این دستگاه ها در آن زمان به بازده ۴/۵% رسیدند و اندکی بعد در سال ۱۹۵۴ به بازده ۶% دست یافتند. تحقیقات بسیاری پیرو این دستاورد جدید به انجام رسید زیرا سیلیکون ایمن بوده و دومین عنصر فراوان بر روی کره زمین می باشد [۱].

ساختارشان بسیار گران قیمت هستند. در شکل ۱ ساختار یک سلول خورشیدی سیلیکونی نشان داده شده است.

پیشرفت در جهت کاهش قیمت سلول های خورشیدی سیلیکونی به ساخت نسل دوم از این سلول ها منجر شد که شامل فیلم های نازک کادمیم تلوراید، کادمیم سلنید، مس ایندیوم گالیم دی سلنید، سلول های خورشیدی سیلیکونی آمورف و سلول های خورشیدی سیلیکونی کریستالی لایه نازک می باشد. نسل دوم سلول های خورشیدی در مقایسه با نسل اول دارای بازده کمتر و در مقابل قیمت پایین تر هستند. نسل سوم از سلول های خورشیدی با هدف بازدهی بالاتر و قیمت پایین تر در مقایسه با نسل اول و دوم طراحی شدند. سلول های خورشیدی دوتایی، سلول های خورشیدی نانو ساختار و سلول های خورشیدی چند اتصال نمونه های از این دستگاه ها می باشند. همچنین انواع دیگر سلول های خورشیدی شامل سلول های خورشیدی مایع حساس شده به رنگدانه، سلول های خورشیدی پرواسکایت، سلول های حساس



شکل ۲- ساختار کریستال برمبنای مواد پرواسکایت ABX_3 [۵].

بازده پرواسکایت مشخصه بزرگی برای جنبه های متنوع برای نرخ شارژ بازترکیب الکترون ها و حفره ها، جذب نوری قوی و همچنین راحتی در ساخت دارد. و یکی از مهمترین جنبه ها و ویژگی های این مواد امکان ترکیب می باشد. پرواسکایت های هایبرید بوسیله روش های ترکیب ساده که بر راحتی تبدیل به سرمایه می شوند تهیه می گردند هنگامی که با تکنولوژی های ساخت فتوولتائیک موجود مانند سلول های خورشیدی حساس شده با رنگ مقایسه می شوند. یکی از ویژگی های مهم برای گسترش افزاره های خورشیدی برای عملکرد بالای اپلیکیشن، قابلیت تحرک حامل شارژ بالا می باشد [۵].

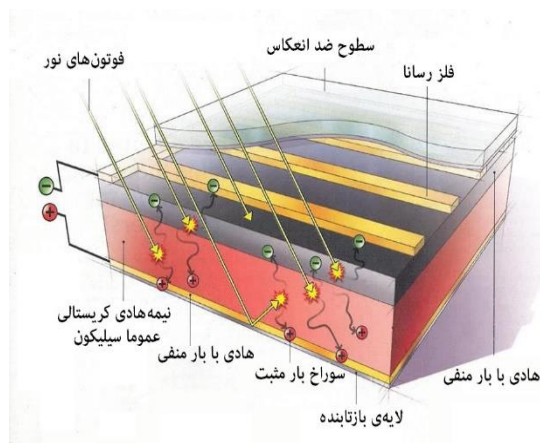
متداول ترین نوع ماده ی پرواسکایتی که مورده استفاده قرار می گیرد ماده ی $CH_3NH_3PbI_3$ می باشد. علت استفاده از این ماده ضریب جذب بالا، انعطاف پذیری در ترکیب با مواد دیگر و همچنین بازدهی بسیار خوب در میان مواد پرواسکایت استفاده شده در سلول خورشیدی می باشد.

در فرمول ABX_3 کاتیون **A** معمولا متیل آمونیوم $CH_3NH_3^+$ می باشد و کاتیون **B**، Pb^{2+} می باشد. انیون هالوژن **X** معمولا I^- است که می تواند **Br** و **CL** هم باشد. ماده ی پرواسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ از ترکیب PbI_2 با متیل آمونیوم یدید CH_3NH_3I بدست می آید.

مسئله اصلی که همراه با هالیدهای ارگانیک و غیر ارگانیک باقی مانده است سمی بودن سرب است. همچنین پرواسکایت ها بر راحتی هنگامی که در محیط ظاهر می شوند جایی که در معرض رطوبت یا در ارتباط با اشعه ماورای بنفش هستند کاهش می یابند [۶].

شده به نقاط کوانتومی و سلول های خورشیدی آلی نیز طراحی و ساخته شده اند [۲].

در ادامه به معرفی امان های پایه و کلیدی این سلول ها جهت آشنایی بیشتر می پردازیم.



شکل ۱- ساختار سلول خورشیدی سیلیکونی [۳].

۲- مواد پرواسکایت^۱

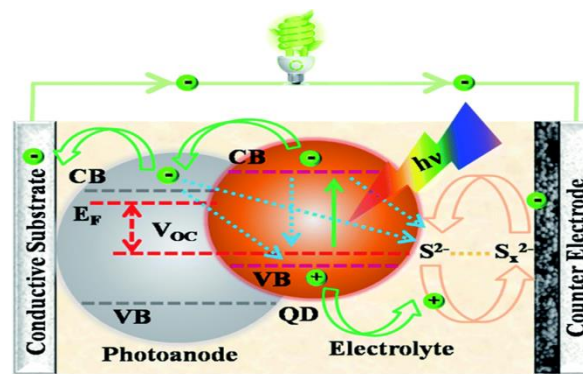
مواد پرواسکایت معمولا فرمول ABX_3 دارند، که فرمول رایجی میباشد، **A** نشان دهنده کاتیون و **B** نیز نشان دهنده کاتیون و **X** نشان دهنده انیون ها می باشد. کاتیون های **A** و **B** موقعیت گوشه را اشغال می کنند در حالیکه انیون **X** در قلب مکعب سلول واحد قرار می گیرد. از نگاهی دیگر برای ساختار پرواسکایت میتوان فرض کرد گوشه پیوند BX_6 در یک هشت وجهی هندسی در یک ساختار درون شبکه ای مثبت قرار می گیرد. [۴].

شکل زیر ساختار مواد پرواسکایت را نشان می دهد. بر مبنای علم بلورشناسی پایداری پرواسکایت و ساختارش به صورت قالب نمایان می شود بوسیله ی فکتور تلورانس گلدشمیت با t و همچنین فاکتور هشت وجهی u .

۳- نقاط کوانتومی^۲

نقاط کوانتومی نیم رسانا های صفر بعدی هستند که منظور از بعد این است که در چند بعد از ماده، حاملین بعنوان حامل آزاد رفتار می کنند. برای مثال در سیم نانویی الکترون ها یا حفره ها فقط در یک جهت بعنوان حامل آزاد عمل می کنند. در یک نقطه حاملین در هیچ جهتی به عنوان حامل آزاد رفتار نمی کنند. وقتی بعد کاهش می یابد چگالی حالت ها به طور محسوسی تغییر می کند که در صفر بعد چگالی حالت های ماده بسیار شبیه به اتم است. نقطه کوانتومی، یک نیمه رسانای نانوساختار است که تحرک الکترون های نوار رسانش، حفره های نوار ظرفیت و یا اکسایتون ها را در هر سه جهت فضایی محدود می کند. توانایی تنظیم گاف انرژی، خصوصیتی است که نقاط کوانتومی را برای استفاده در سلول های خورشیدی مناسب می سازد. از این نظر، آن ها شبیه سلول های چند لایه ای گران قیمت هستند، با این تفاوت که هزینه تولید نقاط کوانتومی بسیار پایین تر است [۷].

سلول های خورشیدی، نیاز به مواد جاذب نوری دارند که بتوانند حامل های بار تولید شده توسط نور را از یکدیگر جدا کنند، با توجه به شکل ۳، با توجه به زوج الکترون-حفره در سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی، این وظیفه بر عهده نقاط کوانتومی می باشد. نقاط کوانتومی، نانو کریستال های نیمه هادی با قطر ۲ تا ۱۰ نانومتر هستند که بعد از تحریک شدن، از خود نور ساطع می کنند و به طور معمول از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ اتم تشکیل شده اند [۸].



شکل ۳- فرآیند تولید جریان در سلول خورشیدی حساس شده با نقطه کوانتومی [۸].

نقاط کوانتومی به دلیل اندازه کوچکشان قابلیت تطبیق پذیری بسیاری دارند یعنی می توان با تغییر ساختار آن، خواص آن را مطابق با نیاز خود تنظیم کرد. تفاوت اصلی آن با نیم رساناهای

دیگر این است که خواص الکتریکی و پیک فرکانسی گسیلی نقاط کوانتومی شدیداً به اندازه و شکل و ساختار آنها بستگی دارد. همچنین با یک عامل خارجی مثل پتانسیل الکتریکی و جریان فوتونی می توان رسانندگی آن را تغییر داد [۹].

اهمیت نیم رسانا بودن نقاط کوانتومی در این است که رسانایی الکتریکی این مواد را می توان با محرک های خارجی مانند میدان الکتریکی یا تابش نور تغییر داد، تا حدی که از نارسا به رسا تبدیل شوند و مانند یک کلید عمل کنند. این خاصیت، نیمه رساناها را به یکی از اجزای حیاتی انواع مدارهای الکتریکی و ابزارهای نوری تبدیل کرده است. ساختار کلی یک نقطه کوانتومی، شامل هسته، پوسته و پوشش دهنده است [۹].

هسته از اتم های گروه II-VI به عنوان مثال سلنید کادمیوم (CdSe)، یا III-V مثل فسفید ایندیوم عناصر جدول تناوبی تشکیل شده است. یک پوسته از جنس نیمه هادی دیگر، در اغلب موارد سولفید روی (ZnS)، به منظور بهبود ویژگی های نوری و افزایش پایداری و کاهش سمیت سلولی، هسته را می پوشاند.

تا به امروز مواد نیمه هادی بسیاری از جمله CuInS2, CdTe, Zn-Cu-In-، InAs, InP, PbSe, PbS, CuS, Se به عنوان نقاط کوانتومی ساخته شده اند. با گاف انرژی بزرگ به عنوان جاذب نور پوشش داده شده اند. نقاط کوانتومی Zn-Cu-In-Se ترکیب آلایژ یا هم جوشه مخلوط یا محلول جامد فلزی متشکل از یک فلز اصلی است که آن را فلز پایه می گویند با یک یا چند عنصر فلزی یا غیرفلزی است. که این مواد فوتون ها را در محدوده وسیعی از طیف خورشیدی جذب می کنند [۱۰].

به علت ویژگی های خاص این مواد از جمله ضریب خاموشی در ناحیه نزدیک مادون قرمز، پهن بودن طیف پاسخ حساس کننده ها، گشتاور دو قطبی ذاتی بالا که منجر به جدایش سریع بارها در آن میشود، تنظیم طیف جذب به وسیله تغییر در اندازه و شکل آنها، تزریق الکترون داغ و تولید چندین اکسایتون به عنوان جایگزینی مناسب برای رنگدانه ها مورد توجه قرار گرفتند.

فیلم های نیمه رسانای نانوساختار با گاف نوری پهن، سطح میکروسکوپی را فراهم می کند که چندین مرتبه بزرگتر از سطح هندسی است. این سطح می تواند با یک لایه نازک جاذب با جذب کنندگی پایین حساس شود. می توان از نانومیل ها، نانوسیم ها، نانولوله ها، نانوصفحات و نظایر آن ها به عنوان نانوساختار استفاده کرد [۱۰].

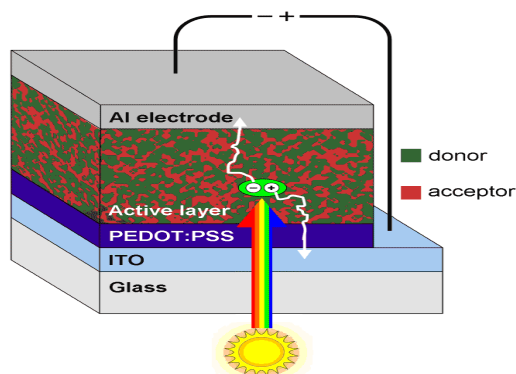
در ادامه به بررسی مختصر انواع سلول های نسل سوم می پردازیم.

² Quantum dots

سلول‌ها قابل اغماض باشد. مسئله اصلی در انواع مختلف سلول‌های خورشیدی، مسئله بازدهی است.

بیش از یک دهه است که محققان در حال تحقیق روی افزایش بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری هستند. دانشمندان هم زمان با بهبود بازدهی، سعی در افزایش طول عمر و انعطاف‌پذیری این سلول‌های خورشیدی دارند. در این سلول‌ها به منظور افزایش شفافیت از شیشه‌های ITO^۵ استفاده می‌شود. به دلیل هزینه بالای این شیشه‌ها، تلاش‌هایی برای جایگزین کردن آن‌ها با مواد ارزان‌تر و انعطاف‌پذیرتر در جریان است. اغلب پلیمرهای نیمه‌هادی، هادی انتقال دهنده‌ی حفره هستند که به این مواد پلیمرهای دهنده گفته می‌شود.[۱۳].

چهار نوع از متداول‌ترین و مهم‌ترین این پلیمرها MEH-PPV3، PCDTBT4 و P3HT2 PFO-PEDOT:PSS است. شکل ۵ معماری این نوع از سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. امروزه، برخی دیگر از پلیمرها نیز که دارای گاف انرژی کمی هستند، در سلول‌های خورشیدی پلیمری استفاده می‌شوند.



شکل ۵- معماری سلول‌های خورشیدی پلیمری [۱۴].

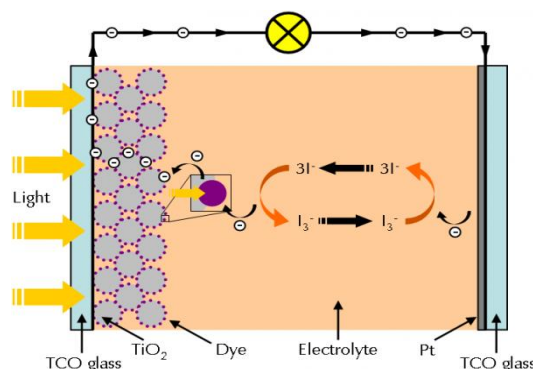
۶- سلول‌های خورشیدی لایه نازک^۶

اولین لازمه‌ی موادی که باید در یک قطعه مبدل انرژی فتوولتائیک خورشیدی به کار روند، گاف انرژی مناسب و نیز داشتن قابلیت تحرک بالا و طول عمر زیاد حامل‌ها می‌باشد. این شرایط توسط بسیاری از ترکیبات گروه های VI.III-V برآورده می‌شوند. نیمه‌هادی‌های ساخته شده Si جدول تناوبی و توسط مواد گروه سوم و پنجم علی‌رغم هزینه‌های بالای استحصال و ساخت، با موفقیت زیاد در کاربردهای فضایی که در آنها هزینه، فاکتور مهمی نیست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سلول‌های خورشیدی ساخته شده مبتنی بر لایه نازک به عنوان نسل دوم سلول‌های خورشیدی نامگذاری می‌شوند[۱۵].

۴- سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه^۳

سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه ارزش قیمتی و کارایی بالا توسط گراتزل و همکاران با استفاده از تیتانیوم دی‌اکسید کلوتیدی، همانگونه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است برای تقلید از فرآیند طبیعی فتوسنتز ارائه شدند که در واقع راهکاری نوین جهت جایگزینی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بودند. حساس سازی نوری کلوتیدی با استفاده از رنگدانه‌هایی که از مشتقات کلروفل و پورفیرین‌های طبیعی بودند بازده کوانتومی بالایی مشابه آنچه که در فرآیند فتوسنتز رخ می‌دهد را نشان می‌دهد.

سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه از یک فوتوآند متشکل از نانوذره نیمه‌هادی مانند TiO_2 ، Zn ، SnO_2 ، الکترودهای شفاف نوری، رنگدانه‌های حساس ساز نوری، نمک‌های معدنی، حلال‌ها و الکترودهای فلزی تشکیل شده‌اند که بهینه‌سازی هر جزء می‌تواند در افزایش بازده تبدیل انرژی این سلول‌ها نقشی مهم ایفا کند. با این حال، سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه معایبی مانند پایداری کم، کپسوله شدن و نشت حلال را دارند. نشت حلال منجر به کاهش غلظت الکترولیت و در نتیجه کاهش عملکرد دستگاه می‌گردد.[۱۱].



شکل ۴- سلول خورشیدی حساس شده به رنگ دانه [۱۲].

۵- سلول‌های خورشیدی پلیمری^۴

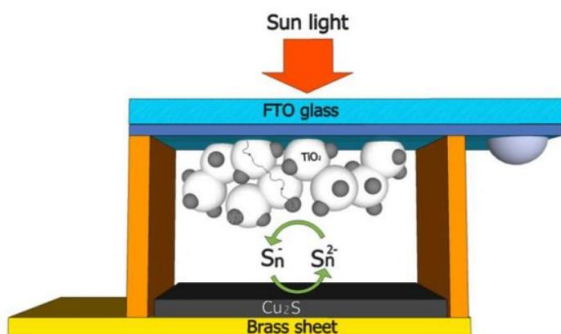
یافته‌ها نشان داد که مواد پلیمری نیمه‌هادی توانایی جذب انرژی نورانی خورشید و تبدیل آن به الکتریسیته را دارا هستند و از طرف دیگر مزایایی چون انعطاف‌پذیری و قابلیت ساخت در ابعاد بزرگ را دارند، همچنین نسبت به سلول‌های خورشیدی سیلیکونی ارزان‌تر هستند که این امر سبب می‌شود بازدهی کم‌تر این

^۵ Indium-tin-oxide

^۶ Thin film solar cells

^۳ Dye sensitized solar cells

^۴ Polymer Solar Cells

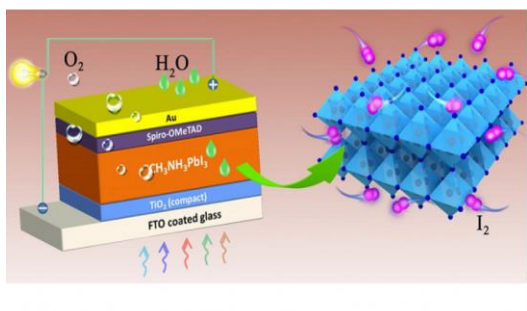


شکل ۶- ساختار سلول خورشیدی نقطه کوانتومی [۱۹].

تغییرات در اندازه نقاط کوانتومی منجر به تغییرات شدت طول موج جذب نور شده در این سلول ها می گردد. در سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی نیز مانند سلول های حساس شده به رنگدانه، لایه TiO_2 اسکلت اصلی سلول را تشکیل می دهد و منجر به حساسیت نوری در این ساختارها می گردد. پوشش دهی ذرات کوانتومی بر روی لایه TiO_2 با استفاده از روش های مختلفی مانند رسوب دهی شیمیایی، جذب و واکنش لایه یونی متوالی امکان پذیر است. مدار الکتریکی در نهایت با استفاده از زوج کاهنده/اکسنده جامد و یا مایع بسته می شود. بازدهی سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی در سلولهای اتصال مایع و سلول های حالت جامد به بیشتر از ۱۱٪ رسیده است. [۲۰].

۸- سلول های خورشیدی پرواسکایت^{۱۱}

جدیدترین نسل از سلول های خورشیدی که حدوداً از سال ۲۰۱۴ مورد توجه جوامع علمی در سراسر دنیا قرار گرفت، سلول های خورشیدی پرواسکایتی میباشند. این گروه از سلولهای خورشیدی از ترکیبات پرواسکایت که عموماً یک هیبرید آلی- معدنی سرب و یا موادی بر پایه هالیدهای قلع هستند تشکیل شده اند. مواد پرواسکایت دارای دو مزیت بسیار مهم هستند: ارزانی در تولید و آسانی در ساخت.



شکل ۷- ساختار سلول خورشیدی پرواسکایت [۲۱].

۶-۱- سلول های خورشیدی لایه نازک سیلیکون غیر بلوری آمورف^۷

اولین سلول های لایه نازک، سلول های سیلیکون غیربلوری موسوم به آمورف هستند که هنوز هم در مقیاس تجاری تولید می شوند و بیشترین سهم را از بازار انواع سلول های لایه نازک دارند. برای تولید این سلولها لایه نازکی از سیلیکون با ضخامت چند میکرون در طی عملیاتی موسوم به رسوب شیمیایی در گاز بخار از گاز سیلان و هیدروژن بر روی شیشه، پلاستیک یا فلز نشاندن می شود. مصرف سیلیکون در این روش حدود ۱٪ سلولهای بلوری است که هزینه تولید را بهشدت کاهش میدهد [البته، ساختار غیربلوری این نوع سلول باعث کاهش بازده آن شده است]. [۱۶].

۶-۲- سلول های خورشیدی لایه نازک کادمیوم تلوراید^۸

سلول های کادمیوم تلوراید تنها سلولهای لایه نازک موجود هستند که توانسته اند از نظر هزینه تولید بر رقیب اصلی این صنعت، یعنی سیلیکون پیشی بگیرند. ماده مرکب بلوری کادمیوم تلوراید، یک نیمه رسانا با شکاف انرژی ۱/۴۴ الکترون ولت است که معمولاً با سولفید کادمیوم اتصال $n-p$ یک سلول خورشیدی فتوولتائیک را تشکیل می دهد. [۱۷].

۶-۳- سلول خورشیدی لایه نازک CIGS^۹

نوع دیگر مواد غیرسیلیکونی که در فناوری لایه نازک استفاده می شود، ماده ای مرکب از عناصر گروههای یک، سه و شش جدول تناوبی شامل مس، ایندیم، گالیوم و سلنیوم، موسوم به CIGS است. این سلولها نیز مانند سایر انواع سلولهای لایه نازک از رسوب روی شیشه یا پلاستیک ساخته می شوند. بهترین بازده سلولهای CIGS حدود ۲۰٪ که بیشترین مقدار در میان انواع سلول های لایه نازک به حساب می آید. [۱۸].

۷- سلول های خورشیدی نقطه کوانتومی^{۱۰}

سلول های خورشیدی نقاط کوانتومی بر پایه سلول های خورشیدی گراتزل یا حساس به رنگدانه طراحی شده اند این گروه از ترکیبات نیمه هادی با باند گپ پایین استفاده می کنند تا بتوان از آنها برای تهیه نقاط کوانتومی مانند Zn-Cu ، CdSe ، CdS ، PbS ، In-Se استفاده نمود. در این دستگاه ها به جای کاربرد رنگدانه های آلی یا آلی فلزی جاذب نور از نقاط کوانتومی استفاده می شود.

⁷ Non-crystalline thin-film solar cells Amorphous

⁸ CdTe Thin film solar cell

⁹ CuInGeSe Thin film solar cell

¹⁰ Quantum dot sensitized solar cell

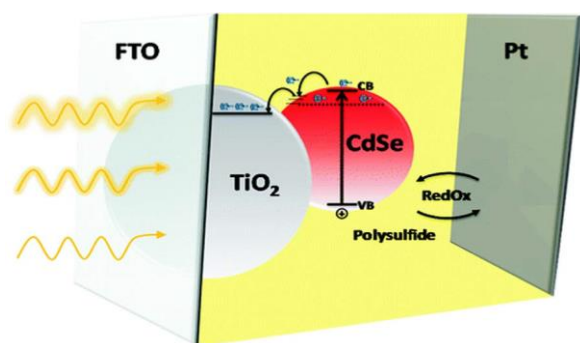
¹¹ Perovskite solar cells

اولین بار مواد پرواسکایت در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ در سال ۲۰۰۶ هنگامی که آقای میکاسا و تیمش از $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ به عنوان حساسگر بر روی TiO_2 برای سلول-های خورشیدی حساس به رنگ استفاده کردند که به بهره تبدیل توان ۲.۲٪ رسیدند [۳۰].

در سال ۲۰۰۹ برای اولین بار از پرواسکایت هالوژنه آلی-فلز در سلول‌های خورشیدی توسط آقای میکاسا و همکارانش استفاده شد. آنها به ترتیب از $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ و $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ به عنوان حساسگر نور قابل رویت در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ استفاده کردند و نشان دادند که به ترتیب بازده تبدیل توان نسبتاً پایینی به مقدار ۳.۸۱٪ و ۳.۱۳٪ دارند [۳۱].

در سال ۲۰۱۰ سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی PbS با بازده ۲٪ عرضه شدند [۳۲]. در سال ۲۰۱۱ آقای پارک و همکارانش با استفاده از نانو ساختارهای پرواسکایت بر روی TiO_2 به عنوان یک حساسگر برای ارتقاء در عملکرد جذب بر روی رنگ‌های معمولی به بهره تبدیل توان ۶.۵٪ دست یافتند [۳۳].

در سال ۲۰۱۲ یک سلول خورشیدی پایدار و تمام جامد و با اندازه-ای متوسط و با بهره تبدیل توان ۹.۷٪ ساخته شد [۳۴]. با توجه به شکل ۹ در سال ۲۰۱۲ آقای حاسین و همکارانش نشان دادند که سلول خورشیدی TiO_2 حساس شده با نقاط کوانتومی CdSe دارای بازده تبدیل توان ۵.۲۱٪ است [۳۵].



شکل ۹- سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی CdSe [۳۵].

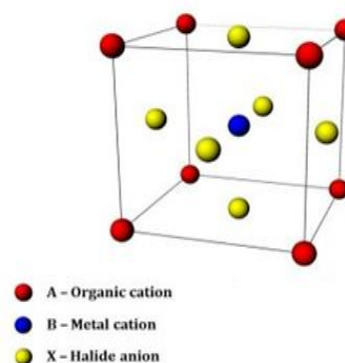
در سال ۲۰۱۳ آقای Lee و همکارانش با استفاده از نقاط کوانتومی PbS-Hg در سلول خورشیدی بر پایه TiO_2 به بازده تبدیل توان ۵.۶٪ دست یافتند [۳۶]. در سال ۲۰۱۳ آقای تیان و همکارانش با استفاده از فتوالکترودهای مزوپروس ZnO در سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی به بازده تبدیل توان ۴.۶۸٪ دست یافتند [۳۷].

نکته ی حائز اهمیت در ارتباط با این گروه از سلول های خورشیدی بازده بسیار بالایی آنها است، به گونه ای که از بازده ۳/۸ درصد در سال ۲۰۰۹ به بازده ۲۰/۱ درصد در سال ۲۰۱۵ رسیدند که تا امروز به عنوان سریعترین تکنولوژی در حال پیشرفت در زمینه سلول های خورشیدی شناخته می شود. قیمت پایین در ساخت و بازده بالا در این گروه از سلول های خورشیدی منجر به ایجاد یک بازار بزرگ در سال ۲۰۱۷ برای این سلول های خورشیدی شده است [۲۲].

۹- مروری بر تحقیقات صورت گرفته بر روی سلول های خورشیدی پرواسکایت و نقاط کوانتومی

نام پرواسکایت از ساختار معدنی CaTiO_3 که توسط معدن شناس آلمانی **Gustav Rose** در سال ۱۸۳۹ کشف شد مشتق شده است [۲۳]. پرواسکایت به عنوان نوع خاصی از ماده ی خورشیدی توسط معدن شناس روسی به نام **L.A. perovski** در سال ۱۸۵۶ مطرح شد و او نام پرواسکایت را برای این ماده برگزید که اکثر مواقع به عنوان یک ماده نوید دهنده برای نسل های آتی سلول های خورشیدی مطرح بود [۲۴]. مبحث مواد پرواسکایت آلی و غیر آلی بوسیله **Topsøe** در سال ۱۸۸۴ مطرح شد [۲۵].

اولین ساختار پرواسکایت مبتنی بر هالوژن در سزیم هالوژنه توسط **Moller** در سال ۱۹۵۸ ارائه شد که ویژگی های رسانایی از طریق تغییر در اجزای هالوژن برای رسیدن به پاسخ های طیفی مختلف تنظیم و تغییر می یافت [۲۶]. اولین ظهور کاتیون آلی در پرواسکایت هالوژنه توسط آقای **Weber** در سال ۱۹۷۸ برای **I** و **CL** و **Br** مطرح و ایجاد گردید [۲۷].



شکل ۸- ساختار ارائه شده مبتنی بر هالوژن [۲۷].

ایده اولیه استفاده از نقاط کوانتومی برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی توسط بورمن و دوگان در سال ۱۹۹۰ مطرح شد [۲۸]. در سال ۲۰۰۴ آزمایشگاه ملی لوس آلاموس گزارش‌هایی مبنی بر افزایش بازده ادوات نیمه هادی با استفاده از انرژی فوتون نقاط کوانتومی ارائه داد [۲۹].

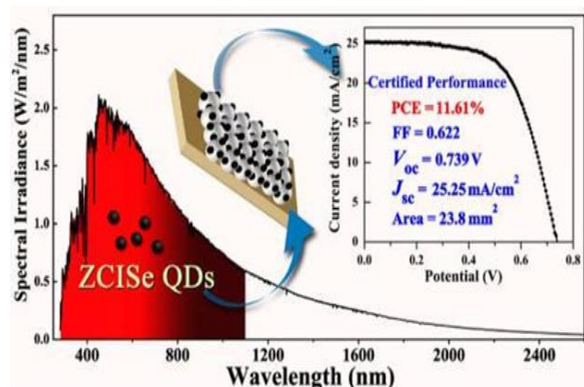
قابلیت بازدهی تبدیل توان بالا برای سلول های خورشیدی پرواسکایت می باشد [۴۳].

در سال ۲۰۱۷ با تحقیقاتی که در دانشگاه های کالیفرنیا و برکلی صورت گرفت بیشترین میزان بازدهی سلول های خورشیدی پرواسکایت ۲۶ % گزارش شد [۴۴].

در سال ۲۰۱۷ یک سلول خورشیدی پرواسکایت با دمای پایین با نانو ذرات TiO_2 به عنوان مواد انتقال الکترون بدون استفاده از مواد انتقال حفره استفاده شد. در این روش وقتی غلظت پراکندگی نانوذرات TiO_2 را به 40 mg/ml رساندند، عملکرد و بازدهی سلول به شدت بهبود پیدا کرد. همچنین سرعت لایه نشانی به منظور دستیابی به یک لایه کاملاً صاف و صیقلی بر روی FTO بسیار حائز اهمیت است؛ به نحوی که هر چه این سرعت بالاتر باشد منجر به یکنواختی بیشتر و آرایش منظم تر نانوذرات TiO_2 و در نتیجه منجر به افزایش میزان انتقال الکترون و کاهش ترکیب الکترون-حفره شده است [۴۵].

سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی $Zn-Cu-In-Se$ که در شکل ۱۰ نشان داده شده است با ۱۱,۶۱ % بیشترین میزان بازدهی را در بین سلول های خورشیدی نقطه کوانتومی دارا هستند که در آنها از فتواند FTO/TiO_2 و شمارشگر الکترون C روی Ti استفاده شده است [۴۶].

در سال ۲۰۱۷ با تحقیقات صورت گرفته بر روی نقاط کوانتومی $Zn-Cu-In-Se$ نشان داده شد که این نقاط دارای پایداری بالا و عدم آلایندگی برای محیط زیست هستند و همچنین بالاترین میزان بازدهی برای نقاط کوانتومی را دارا هستند [۴۷].



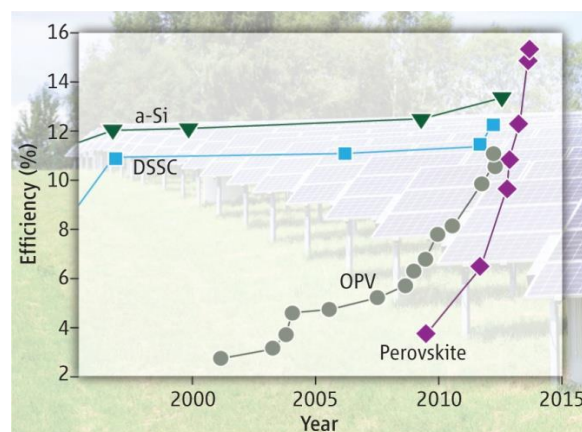
شکل ۱۱- سلول خورشیدی $Zn-Cu-In-Se$ [۴۷].

در سال ۲۰۱۸ آقای پنگ و همکاران با بهبود ذرات متصل بهم باعث افزایش عملکرد سلول های خورشیدی منعطف شدند. آن ها در این روش با ترکیب نانو ذرات TiO_2 با اندازه ۵ نانومتر و اسید

در سال ۲۰۱۳ آقای جولیان و همکارانش با استفاده از روش رسوب گذاری متوالی که به منظور رسیدن به مورفولوژی بهینه- سازی شده لایه پرواسکایت صورت گرفت، به بازده بالای ۱۴,۱ % دست یافتند. همچنین در اواخر سال ۲۰۱۳ آقای جولیان و همکارانش با تلاش بر روی آزمایش گذشته خود و نیز با استفاده از عناصر هالوژنه ترکیبی پرواسکایت به بازده ۱۵,۲ % دست یافتند [۳۸].

در سال ۲۰۱۴ توسط یک نهاد پژوهشی تکنولوژی شیمیایی کره ای (KRICT) بهره تبدیل توان سلول خورشیدی پرواسکایت ۱۶ % گزارش شد که در اواخر سال ۲۰۱۴ توسط آزمایشگاه ملی انرژی های تجدید پذیر (NREL) مورد تایید قرار گرفت [۳۹].

در سال ۲۰۱۵ سلول های خورشیدی پرواسکایت حساس شده با نقاط کوانتومی PbS با بازده ۴,۹۲ % بدست آمد [۴۰]. در سال ۲۰۱۵ آقای یانگ و همکارانش برای اولین بار با استفاده از نقاط کوانتومی کلئیدی PbS به بازده ۸,۹۵ % برای سلول های خورشیدی پرواسکایت دست یافتند که از نانو کریستال های $CH_3NH_3PbI_3$ استفاده شد. در این روش فرایند ساخت سلول- های خورشیدی پرواسکایت حساس شده با نقاط کوانتومی با لایه FTO و با به کارگیری پوشش اسپینی در ۱۵ دقیقه با دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد شکل گرفت که لایه TiO_2 به صورت پوشش روی FTO قرار گرفت که نشان دهنده افزایش بازده در حضور لایه TiO_2 و فتواند FTO و نقاط کوانتومی و همچنین مواد پرواسکایت است [۴۱].



شکل ۱۰- میزان افزایش بازدهی در سلول های خورشیدی پرواسکایت در مقایسه با سایر سلول های خورشیدی نسل سوم [۳۹].

با تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۱۶ سلول های خورشیدی پرواسکایت با استفاده از ماده $CH_3NH_3PbI_3$ به بازده ۲۲,۱ % به دست آمد [۴۲]. با تحقیقات صورت گرفته ماکزیمم بازده تبدیل توان با استفاده از ماده ی پرواسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ از لحاظ تئوری ۳۱,۴ % بدست آمده است که نشان دهنده

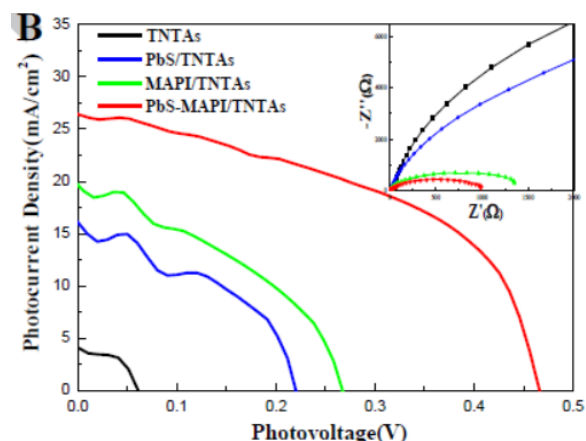
جدول ۱: کارهای صورت گرفته در سال های اخیر

ردیف	محقق	سال	نوع سلول خورشیدی	بازده %
۱	آقای ژوو و همکاران [۵۱]	۲۰۱۴	پرواسکایت با استفاده از نقاط کوانتومی گرافن	۱۰,۱۵
۲	آقای لای و همکاران [۵۲]	۲۰۱۵	پرواسکایت با نیکل اکسید شده	۷,۷۵
۳	آقای دو و همکاران [۵۳]	۲۰۱۶	نقاط کوانتومی ZnCuInSe	۱۱,۹
۴	آقای لی و همکاران [۵۴]	۲۰۱۶	پرواسکایت مسطح مبتنی بر قلع	۱۳,۶
۵	آقای وو و همکاران [۵۵]	۲۰۱۶	پرواسکایت و فلورین	۱۸,۲۱
۶	آقای ژانگ و همکاران [۵۶]	۲۰۱۷	نقطه کوانتومی PbS با نانوکریستال MgZnO	۱۰,۴
۷	آقای مارشال و همکاران [۵۷]	۲۰۱۷	پرواسکایت نقطه کوانتومی CsPbI ₃	۱۳,۴۳
۸	آقای تانگ و همکاران [۵۸]	۲۰۱۷	نقاط کوانتومی CuInTe _{2-x} Se _x	۳,۷۵۱
۹	آقای بارت و همکاران [۵۹]	۲۰۱۷	پرواسکایت p-i-n	۱۱,۳
۱۰	آقای ژانگ و همکاران [۶۰]	۲۰۱۷	نقاط کوانتومی Zn-Cu-In-Se با تغییر نسبت In به Cu	۱۲,۵۷
۱۱	آقای پنگ و همکاران [۴۸]	۲۰۱۸	نانو ذرات TiO ₂	۳,۱۹
۱۲	آقای یو و همکاران [۴۹]	۲۰۱۸	پلیمری و پرواسکایت به همراه گرافن	۱۳,۸۵
۱۳	آقای چن و همکاران [۵۰]	۲۰۱۸	پرواسکایت با نقاط کوانتومی	۵,۹۸

هیدروکلریک در فتوالکترودهای TiO₂ با ضخامت ۲۰ نانومتر با نسبت TiO₂/HCL ۳:۱ به عملکرد خوب در پارامترهای سلول خورشیدی رسیدند. بازده سلول خورشیدی مورد نظر ۳,۱۹% و با ضریب انباشتگی ۰,۴۶۸ می باشد [۴۸].

در سال ۲۰۱۸ یو و همکاران با استفاده از ترکیب مواد پلیمری PEDOT:PSS و گرافن در سلول های خورشیدی پرواسکایت به عنوان ماده انتقال دهنده حفره به بازدهی خوبی رسیدند. استفاده از PEDOT:PSS منجر به هدایت الکتریکی بالاتر سلول خورشیدی و افزایش بلورینگی مواد پرواسکایت شد. که میزان ۱۳,۸۵% بازدهی گزارش شد [۴۹].

در سال ۲۰۱۸ و با ترکیب مواد پرواسکایت CH₃NH₃PBI₃ با نقاط کوانتومی PBS و با استفاده از نانو لوله های TiO₂ اقای چن و همکاران از مواد پرواسکایت و نقاط کوانتومی به طور همزمان در سلول خورشیدی ارائه شده استفاده کردند [۵۰].



شکل ۱۲- ضریب جذب مواد پرواسکایت همراه با نقاط کوانتومی PBS [۵۰].

بیشترین میزان بازدهی از نقاط کوانتومی PBS و مواد پرواسکایت CH₃NH₃PBI₃ و نانو لوله های TiO₂ با میزان ۵,۹۸% بدست آمده است اما با توجه به ضریب انباشتگی میزان ضریب انباشتگی این حالت برای استفاده از فتواند در مقایسه با استفاده از نانو لوله TiO₂ به تنهایی کمتر است [۵۰].

خلاصه ای از کار های صورت گرفته در جدول زیر آمده است:

۱۰- نتیجه گیری

صفحات پرواسکایت موجب افزایش بازدهی در سلول خورشیدی می شوند؛ نقاط کوانتومی نور خورشید بیشتری را جذب می کنند، منجر به افزایش در جریان تولیدی در مدار و در نتیجه بهره تبدیل توان بالا می گردند. با توجه به جدول ۱ سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی **ZnCuInSe** بالاترین میزان بازدهی را در بین سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی را دارند. یکی از مهمترین جنبه ها و ویژگی های مواد پرواسکایت امکان ترکیب است که این امر موجب افزایش بازدهی افزاره طراحی شده می شود؛ همچنین در طراحی سلول خورشیدی یکی از پارامترهای مهم، کاهش تلفات انرژی و به اصطلاح به دام انداختن نور در سلول است که در این روش با کمک و بهره گیری از مواد پرواسکایت که دارای خاصیت جذب بالای نور، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا و برانگیختگی مرزی ضعیف می باشند، بهره سلول به طور قابل توجهی بالا می رود. مواد پرواسکایت به دلیل جذب نور بالا و قابلیت ترکیب با مواد دیگر دارای بازدهی بالایی می باشند اما نقطه ضعف این مواد عدم پایداری در مقابل اکسیژن و همینطور رطوبت می باشد. سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی اگرچه همچنان بازدهی بالایی ندارند اما به دلیل کیفیت خوبی که دارند و قابلیت تنظیم باند گپ به شدت مورد توجه قرار گرفته اند. در سلول های خورشیدی نقطه کوانتومی پهنای شکاف باند نیمه هادی الکترون ها را جمع می کند؛ در حالیکه الکترولیت، حفره ها را از نقاط کوانتومی حذف می کند. هنگامی که این سلول های خورشیدی تحت تابش نور قرار بگیرند، به علت تفاوت تراز فرمی الکترون در اکسید فلز و پتانسیل اکسایش الکترولیت اختلاف پتانسیلی ایجاد می شود. با بهبود ولتاژ و جریان ماکزیمم، ضریب انباشتگی^{۱۲} بهبود می یابد که موجب بهبود کیفیت سلول خورشیدی و در نتیجه افزایش بازده در این نوع از سلول های خورشیدی می شود.

۱۱- منابع:

- comparison) ". Journal of Renewable and New Energy, 2, 45-56, (2017).
- [4] A.Ehtesham, W.Wong, H.Y.Wong, M.Zamani. "Recent Advances in Fabrication Techniques of Perovskite Solar Cells, "American Journal of Applied Sciences, 13, 1290, (2016).
- [5] N. Kour, R. Mehra. "Recent Advances in Photovoltaic Technology based on Perovskite Solar Cell- A Review." International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 04, 1284, (2017).
- [6] H.Chen, D.Liu, Y.Wang, Ch.Wang, T.Zhang, P.Zhang, H.Sarvari, Zh.Chen, Sh.Li. "Enhanced Performance of planar Perovskite Solar Cells Using Low- Temperature Solution- Processed Al- Doped SnO₂ as Electron Transport Layer. " springer, 10, 1186, (2017).
- [7] S.Sahaia, A. Ikrama, S. Raia, R. Shrivastavb, S. Dassb, V. R. Satsangia, " Quantum dots sensitization for photoelectrochemical generation of hydrogen: A review, Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 19-27,(2017).
- [8] Y.C Tsai, M.Y Lee, Y.Li, S. Samukawa. "Design and Simulation of Intermediate Band Solar Cell With Ultradense Type-II Multilayer Ge/Si Quantum Dot Superlattice." IEEE Transaction On Electron Devices, 64, 4567, (2017).
- [9] Z.Wang, et al. " Enhancement of charge transport in quantum dots solar cells by N-butylamine-assisted sulfur-crosslinking of PbS quantum dots." Elsevier Solar (Energy, 174, 399-408, 2018).
- [10] M.Kouhnavard, S.Ikeda, N.A.Ludin, B.V.Ghaffari. A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot-sensitized solar cells. Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 397-407, (2014).
- [11] B. O'regan, M. Grätzel, A low-cost, highefficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films, Nature, Vol. 353, No. 6346, pp. 737-740, (1991).
- [12] C. Raj, R.Prasanth. " A critical review of recent developments in nanomaterials for photoelectrodes in

- [1] F. Lewis, P. Larry, Solar Cells and Their Applications, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.,(2010).
- [2] P.wurfel ,Physics of solar cells, 3rd Edition,Wiely,(2016).
- [3] K.Mokhtari, S.Salem, A.T.Damanabi "Different generation solar cell technologies (evaluation and

¹² Fill factor



- [23] H. Tang, S. He, C. Peng. "A Short Progress Report on High-Efficiency Perovskite Solar Cells." *Nanoscale Research Letters*, 12, 410, (2017).
- [24] M. A. Green, A.H.Baillie. "Perovskite Solar Cells: The Birth of a New Era in Photovoltaics." *ACS Energy Lett.*, 2, 822, (2017).
- [25] H. Topsøe. " Crystallographic-Chemical Investigations of Homologous Compounds. Z. Kristallogr." 18, 246, (1884).
- [26] C.K.Moller, "Crystal Structure and Photoconductivity of Cesium Plumbahalides", *Nature* 182, 1436, (1958).
- [27] D. Weber, "CH₃NH₃PbX₃ , a Pb(II)-System with Cubic Perovskite Structure ", *Inst. Anorg. Chem. Univ. Stutt.* 33b, 1443, (1978).
- [28] K. W. J Barnham, , G.Duggan. " A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells", *Journal of Applied Physics* , 67, 3940, (1990).
- [29] R. Schaller, V. Klimov. "High Efficiency Carrier Multiplication in PbSe Nanocrystals: Implications for Solar Energy Conversion." *Physical Review Letters*, 92, 186601,(2004).
- [30] A. Kojima, K. Teshima, T. Miyasaka, Y. Shirai, ECS, "Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells", 210th Proc ECS Meeting, (2006).
- [31] B.Li, Y.Li, Ch.Zheng, D.Gao, W.Huang. "Advancements in the stability of perovskite solar cells: degradation mechanisms and improvement approaches" 6, 38079, (2016).
- [32] J. Tang, X.Wang, L. Brzozowski, D. Barkhouse, R. Debnath, L. Levina. " Schottky quantum dot solar cells stable in air under solar illumination." *Adv Mater*, 22, 1398, (2010).
- [33] J.-H. Im, C.-R. Lee, J.-W. Lee, S.-W. Park, N.-G. Park "6.5% efficient perovskite quantumdot-sensitized solar cell", *Nanoscale* 3, 4088, (2011).
- [34] H.S. Kim, C.R. Lee, J.H. Im, K.B. Lee, T. Moehl, A. Mar-chioro, S.J. Moon, R. HumphryBaker, J.H. Yum, J.E. Moser, M. Gratzel, N.G. Park, "Lead iodide perovskite sensitized all-solidstate submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%." *Scientific Reports*. 2, 591, (2012).
- [35] M. A. Hossain, R. J. James, C. Shen, P. H. Jia, Z.Y.Koh, M..N.Mathew. " CdSe-sensitized mesoscopic TiO₂ solar cells exhibiting 5% efficiency: redundancy of CdS buffer layer ". *J Mater Chem*, 22, 1623542, (2012).
- dye sensitized solar cells". *J Power Sources*, 317, 32-120,(2016).
- [13] J. Bouclé, P. Ravirajan, J. Nelson, Hybrid polymer-metal oxide thin films for photovoltaic applications, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 17, pp. 3141-3153, (2007).
- [14] J. Y. Kim, K. Lee, N. E. Coates, D. Moses, T.- Q. Nguyen, M. Dante, A. J. Heeger, Efficient tandem polymer solar cells fabricated by allsolution processing, *Science*, Vol. 317, , pp. 222-225, (2007).
- [15] X. Wu, "High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells", *Sol. Energy*, Vol.77, pp. 803-814, (2010).
- [16] G. Zheng, L. Xu, M. Lai, Y. Chen, L. Liu, X. Li, "Enhancement of optical absorption in amorphous silicon thin film solar cells with periodical nanorods to increase optical path length", *Sol. Energy*, Vol.63, pp. 690-701, (2012).
- [17] A. Romeo, M. Terheggen, D. Abou-Ras, D. Ba'tzner, F. Haug, M. Ka'lin, D. Rudmann, A. Tiwari, "Development of thin-film Cu(In,Ga)Se₂ and CdTe solar cells progress in photovoltaic: research and applications", *Prog. Photovolt. Res. Appl*, Vol.12, pp.93-111, (2004).
- [18] S.K.Lee, H.G.Jeong. , "Improvement in CIGS solar cell efficiency using a micro-prism array integrated with (sub-wavelength structures", 186, 254-258, 2018).
- [19] J.Wu, Z.M.Wang, " Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology", springer, 15, 399, (2014).
- [20] A. Varghese et al, "Complete voltage recovery in quantum dot solar cells due to suppression of electron capture," *Nanoscale*, vol. 8, pp. 7248-7256,(2016).
- [21] L.Etgar. , " Hole Conductor Free Perovskite-based Solar Cells," Springer, 3rd Edition, (2016).
- [22] S.Wahid, M.Islam, S.S.Rahman, K.Alam, "Transfer Matrix Formalism-Based Analytical Modeling and Performance Evaluation of Perovskite Solar Cells," *IEEE Transaction On Elecron Devices*, 18, 83-91, (2017).



- [49] M.Yu, et al." Diarylfluorene-based nano-molecules as dopant-free hole-transporting materials without post-treatment process for flexible p-i-n type perovskite solar cells
." Elsevier Nano Energy, 46, 241-248, (2018).
- [50] Q.Chen, et al." Fabrication and Characterization of TiO₂ Nanotubes Sensitized with PbS Quantum Dots-CH₃NH₃PbI₃ Heterostructures as Photoanodes with Liquid Electrolyte." Elsevier Materials Letters, 16, (2018).
- [51] Z. Zhou, J.Ma, Z.Wang, C.Mu, Z.Fan, L.Du, Y.Bai, L.Fan, H.Yan, D.L. Philips, S.Yang. "Efficiency Enhancement of Perovskite Solar Cells through Fast Electron Extraction: The Role of Graphene Quantum Dots." Journal Of The American Chemical Society, 136, 3760, (2014).
- [52] W.C. Lai, K.W. Lin, T.F.Guo, J. Lee. "Perovskite-Based Solar Cells With Nickel-Oxidized Nickel Oxide Hole Transfer Layer. " IEEE Transaction On Electron Devices , 62, 1590, (2015).
- [53] J. Du, Z. Du, J.S.Hu, Z. Pan, Q. Shen, J.Sun. "Zn-Cu-In-Se quantum dot solar cells with a certified power conversion efficiency of 11.6%. " J Am Chem Soc, 138, 4201, (2016).
- [54] Y. Li, Dr. W. Sun, Dr. W. Yan, S. Ye, H. Rao, Z. Zhao, Z. Bian, Z. Liu, C. Huang. "50% Sn-Based Planar Perovskite Solar Cell with Power Conversion Efficiency up to 13.6%."Wiley Advanced Energy Materials, 160, 1353 , (2016).
- [55] Y.Wu,et al. " Perovskite solar cells with 18.21% e-ciency and area over 1 cm² fabricated by heterojunction engineering." Nature Energy, 148, 130-137, (2016).
- [56] X. Zhang, P. K. Santra, L. Tian,, M. B. Johansson, H. Rensmo, E. M. J. Johansson. "Highly Efficient Flexible Colloidal Quantum Dot Solar Cells with Improved Electron Extraction Using MgZnO Nanocrystals. " Acs Nano , 11, 8478, (2017).
- [57] A.R.Marshall, et al. " Enhanced mobility CsPbI₃ quantum dot arrays for record-efficiency, high-voltage photovoltaic cells." Science Advances,3, 1-8, (2017).
- [58] I.M.Tang, et al. " Fabrication of solar cells made with CuInTe₂S_x quantum dots sensitized hierarchical TiO₂ sphere having a CuS counter electrode:
- [36] J. W. Lee , D. Y. Son , T. K. Ahn , H. W. Shin, I. Y. Kim , S. J. Hwang. "Quantum-dot-sensitized solar cell with unprecedentedly high photocurrent." Sci Rep , 3, 1050, (2013).
- [37] J.J.Tian, Q.F Zhang, E. Uchaker, Z.Q Liang, R. Gao, X.H.Qu. " Constructing ZnO nanorod array photoelectrodes for highly efficient quantum dot sensitized solar cells." J Mater Chem, 1, 67705, (2013).
- [38] X.Tong, F.Line, J.Wu, Zh.Wang. "High Performance Perovskite Solar Cells " Advanced science , 3 , 1500201, (2016).
- [39] W. S. Yang , J. H. Noh , N. J. Jeon , Y. C. Kim , S. Ryu , J. Seo , S. I. Seok , Science 348 , 1234, (2015).
- [40] Y. Yang, W.Wang. "Effects of incorporating PbS quantum dots in perovskite solar cells based on CH₃NH₃ PbI₂." Journal of Power Sources ,293, 84, (2015).
- [41] Z.Yang, A.Janmohamed, X.Lan, F. P. García, O.Voznyy, E.Yassitepe. "Colloidal quantum dot photovoltaics enhanced by Perovskite shelling". Nano Lett, 15, 39, (2015).
- [42] M. K. Nazeeruddin. " In retrospect: twenty-five years of low-cost solar cells". Nature 538, 463, (2016).
- [43] W. J. Yin, J. H. Yang, J.Kang , Y.Yan, S. H. Wei. "Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review. " J Mater Chem A, 3, 8926, (2015).
- [44] O.Ergen, S. M. Gilbert, T.Pham, S. J. Turner, M. T. Z.Tan, M. S. Worsley, S.Zettl. "Graded bandgap perovskite solar cells". Nat Mater, 16,522, (2017).
- [45] M.Hatamvand, A.Mirjalily, A.Behjat, M.Jabbari. "Fabrication parameters of low- temperature TiO₂-based hole- transport- free perovskite solar cells. " optic- international journal, (2017).
- [46] Z. Ahmada, M. A.. Najeeba, R.A. Shakoora , A. Al-Muhtasebb , F. Touatic. "Limits and possible solutions in quantum dot organic solar cells."(Elsevier) Renewable and Sustainable Energy Reviews, 321, 1364, (2017).
- [47] M. Ye, X. Gao, X. Hong, Q. Liu, C. He, X. Liu, C. Lin. "Recent advances in quantum dot-sensitized solar cells: insights into photoanodes, sensitizers, electrolytes and counter electrodes. " Sustainable Energy Fuels, 3, 1039, (2017).
- [48] Z.Peng, et al." Improving on the interparticle connection for performance enhancement of flexible quantum dot sensitized solar cells." Materials Research Bulletin, 39, 10-16, (2018).



Dependence on the Te/Se ratio.”Elsevier Materials Letters, 199, 41-45, (2017).

[59] G.H.Bart, et al. “ Improved efficiency of NiOx-based p-i-n perovskite solar cells by using PTEG-1 as electron transport layer.” Apl Materials, 5, 31-36, (2017).

[60] L.Zhang, et al. ” Copper deficient Zn–Cu–In–Se quantum dot sensitized solar cells for high efficiency.” Journal of Materials Chemistry,39,24-31, (2017).