

بررسی و مقایسه عملکرد نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی

کیوان مختاری^۱، شیوا سالم^{۲*}، احمد تقی زاده دامناپی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

۲- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

۳- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

* ارومیه، ایران، صندوق پستی، s.salem@che.uut.ac.ir

چکیده

استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان انرژی تجدیدپذیر، یکی از بهترین راه حل‌های ممکن جهت تامین انرژی مورد نیاز بشر است. در حال حاضر چندین فناوری در ساخت سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فناوری نسل اول، سلول‌ها بر پایه ویفرهای سیلیکونی با ضخامت ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکرون ساخته شده و ساختار کریستالی دارند. تکنولوژی نسل دوم و سوم بر اساس لایه نشانی نیمه هادی‌ها روی بسترهای شیشه‌ای، فلزی و یا پلیمری بوده و در ضخامت‌های ۳ تا ۵ میکرون ساخته می‌شوند. هزینه مواد اولیه در تکنولوژی نسل‌های دو و سه پایین‌تر از تکنولوژی نسل اول است. همچنین این سلول‌ها از نظر اندازه ۱۰۰ برابر بزرگتر از اندازه سلول ساخته شده با تکنولوژی نسل اول هستند. البته لازم به ذکر است که بازدهی سلول‌های نسل اول به دلیل کیفیت بالای مواد از بازدهی سلول‌های نسل‌های دیگر بیشتر است. انتظار می‌رود اختلاف بازده میان سلول‌های نسل‌های مختلف با گذشت زمان کمتر شده و تکنولوژی نسل دوم و سوم جایگزین تکنولوژی نسل اول شوند. در تحقیق حاضر ضمن بررسی کلی ساختارهای این سلول‌ها، راه‌های ممکن جهت بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلیدواژگان: سلول خورشیدی، سیلیکون، گالیم آرسناید، حساس به رنگ، کوانتومی

Different generation solar cell technologies (evaluation and comparison)

Keyvan Mokhtari¹, Shiva Salem^{2*}, Ahmad Taghizadeh Damanabi³

1- M.Sc. Student, Faculty of Chemical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Chemical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

3- B.Sc. Student, Faculty of Chemical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

* P.O.B. 123456789 Urmia, Iran, s.salem@che.uut.ac.ir

Received: 25 September 2016 Accepted: 13 January 2017

Abstract

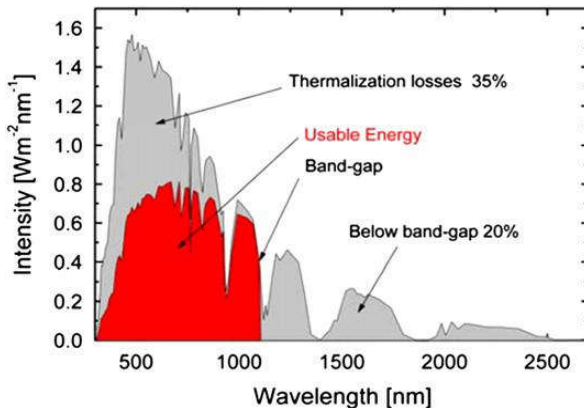
Solar energy is one of the best possible solutions that can be applied as renewable energy resources. In recent years, few technologies are used for manufacturing of solar cells. In the first-generation solar cell is mainly made by crystalline silicon wafer with 300-400 μm thickness. In the second and third technologies fabrication of solar cells is based on the deposition of semiconductors on the glass, metal or polymer substrates. The thickness of these coating is around 3-5 μm . The cost of raw materials in second and third technologies is less than the first generation. Moreover, the size of these solar cells is approximately 100 times larger than the first one. It should be noted that the efficiency of the first generation in comparison to the other technologies are high due to the high quality raw materials which are used in the fabrication. It is expected that the differences between the efficiency of these for technologies will be decreased by the time and other technologies will be replaced by the first generation. In this research, the structure of different technologies has been studied and the possible methods for improvement of the solar cells efficiency have been introduced.

Keywords: Solar Cell, Silicon, GaAs, Dye-Sensitized Solar Cell, Quantum



۱- مقدمه

صنعتی آن به صورت انبوه و همچنین بازدهی بالای آن در مقایسه با سایر انواع نیمه رساناها است. در حال حاضر بازدهی که از عملکرد این سلول ها گزارش شده است، حدود ۲۹٪ می باشد [۶]. همان طور که قبلا اشاره شد سلول های فتوولتائیک با طول موج خاصی کار می کنند. شکل ۱ نشان می دهد که در سلول های خورشیدی سیلیکونی، ۲۰٪ طول موج های تابیده شده، به دلیل پایین بودن انرژی فوتون ها، قادر به برانگیختن الکترون نیستند علاوه بر این، ۳۵٪ طول موج هایی که انرژی آنها از انرژی لازم برای برانگیخته کردن برخوردار است به صورت گرما هدر می رود [۷، ۱۶ و ۱۵].



شکل ۱ نمودار شدت انرژی فوتون بر حسب طول موج [۱۳]

سیلیکون به ویژه در حالت کریستالی، برخی خصوصیات شیمیایی ویژه و منحصر به فرد دارد. یک اتم سیلیکون ۱۸ الکترون دارد که در سه پوسته مختلف مرتب شده اند. دو لایه اول که دو و هشت الکترون دارند، کاملا پرهستند. تنها نیمی از ظرفیت لایه یا پوسته بیرونی با چهار الکترون پر شده است. اتم سیلیکون همواره به دنبال راهی است تا لایه آخر خود را کامل کند و برای انجام این کار الکترون های خود را با چهار اتم کناری خود به اشتراک می گذارد. مانند اینکه هر اتم با اتم های کناری دست به دست هم داده و با چهار همسایه خود متحد شوند. این همان چیزی است که آن را ساختمان متبلور یا کریستالی می گویند و این ترکیبی است که در سلول های فتوولتائیک سیلیکونی اهمیت فراوانی پیدا می کند. تنها مشکل این است که سیلیکون کریستالی خالص رسانای الکتریسته ضعیفی دارد، زیرا بر خلاف مواد رسانایی همچون مس، هیچ یک از الکترون های آن برای انتقال الکتریسته آزاد نیستند. برای حل این مشکل، سیلیکون مورد استفاده در سلول خورشیدی با برخی اتم های دیگر ترکیب شده و ناخالصی موجود کمی شیوه کار اتم های سیلیکون را تغییر می دهد. فرآیند اضافه کردن ناخالصی را تغلیظ می نامند. این کار اگر توسط اتم فسفر انجام شود به سیلیکون تولید شده توسط این فرایند سیلیکون نوع N^۴ می گویند که حرف N از کلمه نگاتیو^۵ گرفته شده است، زیرا این کار باعث از دست دادن الکترون می شود. سیلیکون تغلیظ شده نوع N رسانای بسیار بهتری نسبت به سیلیکون خالص است. بخش دیگر سلول های خورشیدی سیلیکونی، سیلیکون تغلیظ شده با عنصر بور است. در این حالت سیلیکون تولیدی را نوع P^۶ می نامند که

امروزه تأمین انرژی مورد نیاز بشر توسط منابع گوناگونی انجام می شود که بخش عمده ای از آن را سوخت های فسیلی مانند نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی تشکیل می دهند. با توجه به روند رو به رشد میزان جمعیت، میزان تقاضای انرژی نیز در حال افزایش است به طوریکه محققان پیش بینی کرده اند که بشر تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۳۰ تراوات^۱ انرژی نیاز خواهد داشت [۲ و ۱]. به منظور تأمین این میزان انرژی و همچنین کاهش نشر گازهای گلخانه ای و حفظ محیط زیست، جایگزینی بخش و یا تمامی سوخت های فسیلی با انرژی های پاک و تجدید پذیر امری اجتناب ناپذیر است.

انرژی خورشیدی یکی از بهترین منابع تولید کننده انرژی است به طوری که انرژی قابل دسترس از این طریق، حدود ۶۰۰۰ برابر مصرف جهانی انرژی است و کمتر از ۰/۰۲٪ منابع انرژی خورشیدی برای جایگزین کردن کامل سوخت های فسیلی و انرژی هسته ای کافی است. یکی از روش های استفاده از این منبع انرژی به کار گیری سلول های خورشیدی است. سلول خورشیدی وسیله ای است که انرژی خورشید را به وسیله اثر فتوولتائیک^۲ و بدون اتصال به منبع ولتاژ خارجی به برق تبدیل می کند. فرآیندی که یک سلول، نور خورشید (فوتون) را به جریان الکتریکی تبدیل می کند به اثر فتوولتائیک معروف است. اثر فتوولتائیک فقط با برخی از طول موج ها انجام می پذیرد. دلیل این امر آن است که نور خورشید (فوتون) باید حداقل انرژی را برای برانگیختن الکترون های ماده داشته باشد. بخشی از فوتون که انرژی کافی برای برانگیختن الکترون در نیمه رسانا را نداشته باشد، توسط ماده فتوولتائیک جذب نمی شود. از سوی دیگر اگر انرژی فوتون بیشتر از میزان انرژی لازم برای برانگیختن الکترون باشد، انرژی اضافی هدر می رود [۳].

متأسفانه یک سلول فتوولتائیک فقط می تواند حدود ۲ وات توان تولید کند. به همین دلیل برای افزایش توان خروجی، تعدادی از سلول های فتوولتائیک را به هم وصل کرده و مدول^۳ ها را می سازند. مدول های فتوولتائیک در بیشتر موارد دارای مساحت کمتر از یک متر مربع هستند و می توانند توانی در حدود ۵۰ تا ۱۵۰ وات تولید کنند. از کنار هم قرار دادن این مدول ها آرایه های فتوولتائیک تشکیل می شوند [۴].

تاکنون مواد و روش های مختلفی در ساخت سلول های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته که منجر به تولید سلول ها با بازده و هزینه های ساخت متفاوت شده است. لازم به ذکر است که هدف از طراحی سلول های مختلف، ساخت نوعی سلول خورشیدی است که توانایی جذب طول موج های مختلف با بیشترین بازده ممکن را داشته باشد. سلول های خورشیدی به چند نسل مختلف تقسیم بندی می شوند که هر یک از این نسل ها به لحاظ عملکرد و ساخت با هم متفاوت هستند [۵].

هدف از انجام این تحقیق، مرور کلی بر دستاورد های تحقیقات انجام شده در زمینه ساخت سلول های خورشیدی است. در این مقاله انواع سلول های ساخته شده در هر نسل به همراه نحوه عملکرد، هزینه ساخت و بازده بررسی می شوند.

۲- سلول های خورشیدی سیلیکونی

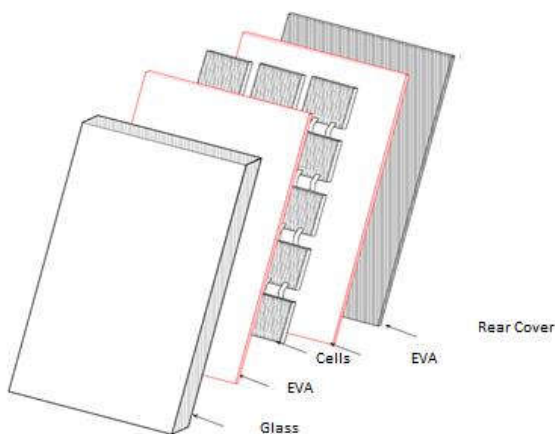
بیش از ۹۵٪ سلول های خورشیدی تولید شده ساختار سلسیومی دارند. علت اصلی فراوانی این نوع سلول ها، رشد سریع تکنولوژی ساخت این عنصر، تولید

¹Tera watt
² Photovoltaic
³ Modules

⁴ N-Type
⁵ Negative
⁶ P-Type

۲-۲ سلول های سیلیکونی پلی کریستالی

سلول های خورشیدی پلی کریستالی که از نسل دوم سلول های خورشیدی می باشند از دانه های ریز سیلیکون تک کریستالی ساخته شده اند. بازده این سلول ها نسبت به سلول های سیلیکونی تک کریستالی کمتر است. این کاهش بازده به این خاطر است که مرز بین دانه های سلول پلی کریستالی مانع از جریان الکترون ها شده و در نتیجه بازده بیرونی سلول را کاهش می دهد. بازده تبدیل انرژی برای مدول های تجاری ساخته شده برای سیلیکون های پلی کریستالی در گستره ۱۰ تا ۱۴ درصد می باشد. استحکام و هزینه ساخت پایین سلول های سیلیکونی پلی کریستالی نسبت به سیلیکون تک کریستالی باعث جبران بازده کم این نوع سلول ها شده است [۲ و ۱۰-۸]. در شکل ۳ شماتیکی از مدول فتوولتاییک استاندارد سیلیکون نشان داده شده است [۹].



شکل ۳ شماتیک مدول فتوولتاییک استاندارد سیلیکون [۹]

۲-۳ سلول های خورشیدی سیلیکونی آمورف

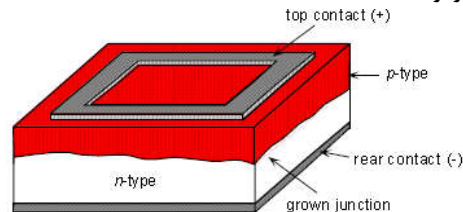
سیلیکون آمورف، یک ماده غیر کریستالی از اتم های سیلیکون است که در ساختار بلوری آنها بی نظمی وجود دارد. جذب نور بالا یکی از مهمترین مزایای این گونه سلول ها است به طوری که جذب نور این سلول ها، ۴۰ برابر بیشتر از سلول های سیلیکونی کریستالی می باشد. این خاصیت سیلیکون های آمورف باعث شده که جذب نور لایه نازکی از این سلول ها با جذب نور چند لایه از سلول های سیلیکونی کریستالی برابر باشد. این ویژگی سلول های سیلیکونی آمورف باعث شده تا هم سیلیکون مورد نیاز برای ساخت سلول های خورشیدی و هم هزینه ساخت این سلول ها کاهش یابد [۱۲ و ۴].

مشکل اصلی سلول های سیلیکونی آمورف بازده تبدیل انرژی آنها است. دلیل اصلی این امر بی نظمی در ساختار کریستالی آنها است به طوری که بازده این سلول ها، در گستره ای از ۷ تا ۱۰ درصد می باشد. در سال های اخیر تلاش های زیادی برای افزایش بازده اینگونه از سلول های خورشیدی انجام شده که به عنوان نمونه می توان به، افزایش جذب نوری این سلول ها با استفاده از نانو میله ها و افزایش مسیر نوری اشاره کرد [۱۳ و ۱۱].

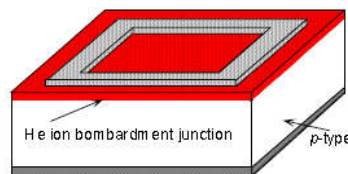
از معروفترین نمونه های سیلیکون آمورف که در بیشتر تحقیقات و سلول های خورشیدی از آنها استفاده می شود می توان به سیلیکون آمورف هیدروژنی^۵ و سیلیکون آمورف ژرمانیوم هیدروژنی^۶ اشاره کرد [۱۴]. لازم به ذکر است که در

^۵ A-Si:H
^۶ A-SiGe:H

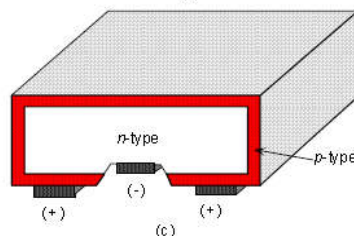
حرف P از کلمه پازیتیو^۱ گرفته شده است زیرا این سیلیکون در لایه آخر خود جای خالی برای یک الکترون داشته و با جذب حامل ها بار مثبت پیدا می کند. هنگامی که این دو نوع سیلیکون ناخالص در ارتباط با هم قرار می گیرند، یک میدان الکتریکی ایجاد می شود که به الکترونها اجازه می دهد که از سمت سیلیکون نوع P به سمت سیلیکون نوع N حرکت کنند. این حرکت باعث می شود که جریان الکتریکی بوجود آید. این جریان الکتریکی با استفاده از یک مسیر خروجی در مدار جریان می یابد. انرژی لازم برای اینکه الکترون ها از سمت سیلیکون نوع P به سمت سیلیکون نوع N حرکت کنند، توسط فوتون هایی که سلول فتوولتاییک جذب می کند تامین می شود (شکل ۲) [۳ و ۴ و ۸].



(a)



(b)



(c)

شکل ۲ شمایی از سلول خورشیدی سیلیکونی (کریستالی) [۸]

معمولا سلول های خورشیدی سیلیکونی به سه دسته تقسیم بندی می شوند که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند.

۱-۲ سلول های سیلیکونی تک کریستالی

این سلول ها، نسل اول سلول های خورشیدی را تشکیل می دهند. از این حیث یکی از رایج ترین نوع سلول های خورشیدی در صنعت فتوولتاییک می باشند. این نوع سلول ها دارای ساختار یکنواخت و غیر سمی هستند و به خاطر فراوانی زیاد، در مدارهای الکتریکی صنعتی کاربرد بسیاری دارند. این سلول ها، بازده بالایی نسبت به دیگر انواع سلول های کریستالی^۲، پلی کریستالی^۳ و آمورف^۴ دارند که این میزان بازده برای مدول فتوولتاییک این نوع از سلول ها در گستره ای از ۱۵ تا ۲۹ درصد می باشد [۴ و ۱۰-۸].

^۱ Positive
^۲ Crystalline
^۳ Poly-Crystalline
^۴ Amorphous



مشکل مواجه کرده است. یکی دیگر از معایب سلول های ساخته شده از این نوع ماده، این است که کادمیم تلوراید یک زیر لایه سمی است. هر چند به میزان خیلی کمی از این ماده سمی در ساخت مدول ها استفاده می کنند [۲۲-۲۵].

اخیرا تانگ^۳ و همکارانش سلول های خورشیدی را بر پایه نانوسیم با هسته کادمیم سولفید و پوسته مس سولفید تولید کرده اند. مکانیسم عملکرد این نوع سلول ها مبتنی بر واکنش های تبادل کاتیونی در دمای پایین است. بازده تبدیل انرژی این سلول ها ۵/۴٪ بیشتر از سلول های خورشیدی مبتنی بر کادمیم تلوراید است. ولتاژهای مدار باز و بسته جز عواملی هستند که تعیین حداکثر انرژی تولیدی در سلول های خورشیدی را بر عهده دارند. ترویج سلول های خورشیدی بر پایه این نانو سیم های ارزان و مناسب می تواند ولتاژ مدار را افزایش دهد. توانایی تولید سلول های خورشیدی مبتنی بر نانوسیم با یک فرآیند کارآمد و با استفاده از عناصر قلیایی خاکی می تواند به طور قابل توجهی هزینه ساخت را در مقایسه با روش های تولید موادی که به درجه حرارت زیادی نیاز دارند کاهش دهد [۲۶].

۳-۳ مس ایندیوم دی سلنید^۴

این ترکیب از نیمه هادی های پلی کریستالی مس، ایندیوم و سلنیوم تشکیل شده است. این ماده یکی از عمده مواد مورد استفاده در تولید انرژی پاک می باشد. دلیل این امر بازده بالا تبدیل انرژی آن است که در حدود ۱۷ تا ۱۸٪ است.

به دلیل بازده بالا در دریافت و تبدیل انرژی، ترکیب مواد، تراکم و پیوستگی یکنواخت در قسمت های مختلف آن، این ماده در رقابت با دیگر مواد مورد استفاده در سلول های خورشیدی، کاربرد بیشتری یافته است. لازم به ذکر است که بازده این نوع سلول با گذشت زمان کاهش نمی یابد [۲۷ و ۲۲].

ایندیوم دی سلنید جزو نیمه هادی های با جذب نور بالا است و در ضخامتی در حدود نیم میکرون ۹۰٪ طیف خورشید را جذب می کند [۲۸ و ۲۳].

ایندیوم دی سلنید یک ماده موثر ولی پیچیده است و این مساله مشکلاتی را در فرآیند تولید ایجاد می کند. همچنین مسئله ایمنی نیز یکی دیگر از نگرانی ها در فرآیند تولید این نوع سلول ها می باشد. زیرا هیدروژن سلنید تولید شده در این فرآیند به شدت سمی می باشد و به همین خاطر ایندیوم دی سلنید کاربرد تجاری ندارد [۲۸ و ۲۳ و ۲۹].

۴-۳ سلول های خورشیدی مبتنی بر مواد آلی

سلول های خورشیدی ساخته شده از مواد آلی در مقایسه با همتایان دیگر خود بازده بسیار کمتری دارند. اما به دلیل هزینه ساخت پایین و همچنین قابلیت هایی مانند انعطاف پذیری، برای مصارف غیرصنعتی مناسب هستند. سلول های خورشیدی مبتنی بر مواد آلی شامل سلول های خورشیدی حساس به رنگ، سلول های خورشیدی پلیمری، سلول های خورشیدی کریستال مایع و سلول های خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی می باشند که نسل سوم سلول های خورشیدی را تشکیل می دهند.

۴-۱ سلول خورشیدی حساس شده با رنگ^۵ (DSSC)

انواع سلول های سیلیکونی، سیلیکون آمورف و سیلیکون پلی کریستالی به صورت لایه نازک ساخته می شوند یعنی اینگونه از سیلیکون ها از نسل دوم سلول های خورشیدی می باشند [۱۲].

۳-۳ سلول های خورشیدی لایه نازک

اولین لازمه 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 حامل ها می باشد. این شرایط توسط بسیاری از ترکیبات گروه های II-VI، III-V، جدول تناوبی و Si برآورده می شوند. نیمه هادی های ساخته شده توسط مواد گروه سوم و پنجم علی رغم هزینه های بالای استحصال و ساخت، با موفقیت زیاد در کاربردهای فضایی که در آنها هزینه، فاکتور مهمی نیست مورد استفاده قرار گرفته اند. سلول های خورشیدی ساخته شده مبتنی بر لایه نازک به عنوان نسل دوم سلول های خورشیدی نامگذاری می شوند.

۳-۱ سلول های خورشیدی مبتنی بر گالیم آرسناید^۱

عملکرد سلول خورشیدی گالیم آرسناید تقریباً مشابه سلول های سیلیکونی است. اما با این وجود سلول های سیلیکونی کریستالی برای جذب نور خورشید نیاز به ضخامت در حدود ۱۰۰ μm یا بیشتر از آن را دارند. این در حالیست که GaAs با توجه به گاف انرژی ایده آل خود که در حدود ۱/۴۳ eV است، فقط با ضخامت اندکی می تواند بازده جذب نوری ای در حدود ۲۵ الی ۳۰٪ ایجاد کند که این نشان از کارایی بالای GaAs نسبت به سیلیکون های کریستالی است. همچنین با توجه به مقاوم بودن GaAs نسبت به سیلیکون کریستالی در برابر گرما و تشعشعات خورشیدی گالیم آرسناید یک انتخاب ایده آل برای سیستم های متمرکز کننده و کاربرد های فضایی می باشد. به دلیل قیمت زیاد زیر لایه ای که گالیم آرسناید روی آن رشد می کند، این نوع سلول خورشیدی توسعه زیادی نداشته است. در حال حاضر دو نگرش برای کاهش هزینه وجود دارد. ساخت سلول های خورشیدی گالیم آرسناید بر روی زیر لایه های کم هزینه تر مانند سیلیسیوم یا ژرمانیوم و یا ساخت زیر لایه هایی که قابل تعویض باشند. لازم به ذکر است که این زیر لایه های قابل تعویض می توانند طوری طراحی شوند که بعد از تعویض در سلول های خورشیدی دیگری نیز مورد استفاده قرار گیرند [۱۷ و ۱۸].

تحقیقات اخیر حاکی از آن است که افزایش بازده تبدیل انرژی این گونه از سلول ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است این در حالی است که اخیراً از ZnO به عنوان پوشش ضد انعکاس بر روی این نوع از سلول ها مورد استفاده قرار گرفته است بطوری که میزان بازده جذب نور این سلول ها از ۳۰٪ به ۵۱٪ رسیده است [۲۱-۱۹].

۳-۲ کادمیم تلوراید^۲

این سلول خورشیدی همانند سایر ترکیبات نیمه هادی، از پلی کریستال های کادمیم و تلوریم ساخته شده است. کادمیم تلوراید دارای یک سطح جذب نور بالاست و می تواند حدود ۹۰٪ طیف مرئی خورشید را جذب کند. مزیت دیگری که کادمیم تلوراید دارد فرآیند تولید آسان و ارزان آن می باشد. بازده تبدیل انرژی برای مدول های کادمیم تلوراید تجاری در محدوده بازده سلول های سیلیکونی آمورف است و این میزان در حدود ۷٪ می باشد. رفتار ناپایدار سلول ها و مدول های فتوولتائیک کادمیم تلوراید، کاربرد این نوع سلول را با

³ Tang

⁴ CuIn(S₂)₂

⁵ Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC

¹ GaAs

² CdTe



شیشه باید بگونه ای باشد که مقاوت آن پایین بوده و شفافیت زیادی داشته باشد. علت اصلی این امر به الکترون ساطع شده از آند برمی گردد یعنی باید الکترون با صرف کمترین انرژی از این بستر شیشه ای عبور کند.

مواد به کار رفته به عنوان شیشه رسانا شفاف به شرح زیر هستند:

۱. ایندیموم آلاینده شده به قلع اکسید^۴ (ITO)

۲. فلئور آلاییده شده به قلع اکسید^۵ (FTO)

۳. اکسید روی (ZnO)

۴. گالیم آلاینده شده با اکسید روی^۶ (GZO)

معمولا در اکثر موارد از فلئور آلاییده شده^۷ با قلع اکسید (FTO) به عنوان اکسید رسانای شفاف استفاده می کنند. دلیل استفاده از FTO به این خاطر است که در شرایط جوی، نسبتا پایدار، از نظر شیمیایی بی اثر، از لحاظ مکانیکی سخت، مقاوم در دماهای بالا و دارای استحکام بالا در برابر سایش فیزیکی بوده و ارزان تر از ایندیموم آلاییده شده با قلع اکسید و گالیم آلاییده شده با اکسید روی می باشد [۳۳]. کارایی شیشه اکسید های رسانا در جدول ۱ نشان داده شده است:

جدول ۱ بررسی میزان کارایی شیشه اکسید های رسانا [۳۴ و ۳۵]

کارایی (%) (FF)	نام ماده
۷/۴۲	FTO
۲/۵	ZnO
۴/۵۳	ITO
۳/۴	GZO

۴-۲ فتوالکترو دیتانیوم دی اکسید

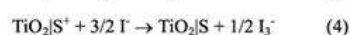
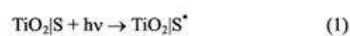
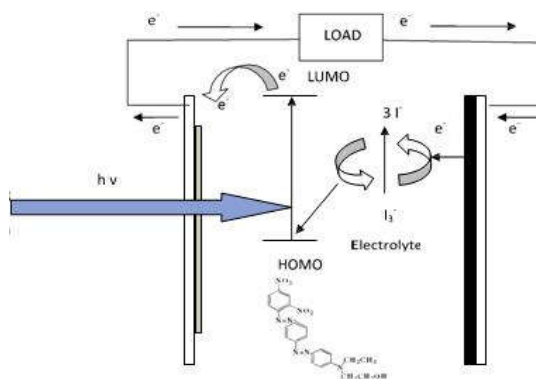
فتوالکترو دیتانیوم دی اکسید^۸ به عنوان ماده پایه برای نگه داشتن رنگ دانه در سلول های خورشیدی حساس به رنگ استفاده می شود و الکترون های برانگیخته شده را از رنگ، توسط مدار خارجی به الکترو د شمارشگر انتقال می دهد. تیتانیوم دی اکسید به دلیل داشتن مساحت سطح به حجم بسیار بالا برای نانو ذرات، امکان جذب مقدار بیشتری از رنگ را روی سطح خود فراهم می سازد. علاوه بر این، الکترو لیت موجود در سلول خورشیدی در آن نفوذ کرده و باعث می شود سرعت انتشار یون ها را در سلول خورشیدی کنترل نماید.

تاکنون از مواد گوناگونی به عنوان ماده پایه رنگ دانه استفاده شده است که در جدول ۲ به مهمترین آنها اشاره شده است:

تاریخچه حساس سازی با رنگ به قرن نوزدهم یعنی زمان اختراع عکاس بر می گردد. دستاورد ووگل^۱ در برلین بعد از سال ۱۸۷۳ را می توان به عنوان اولین مطالعه مهم حساس سازی مواد نیمه رسانا با رنگ بررسی کرد که در آن امولسیون های نقره هالید برای تولید فیلم های عکاسی سیاه و سفید توسط رنگ ها سنتز شدند [۳۰].

روش ساخت سلول های حساس به رنگ توسط پروفیسور گرتزل^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۱ در دانشگاه صنعتی فدرال لوزان سوییس کشف شد، که این روش ساخت همان فناوری لایه نازک می باشد با این تفاوت که آنها توانسته بودند یک سلول خورشیدی حساس به رنگ با بازده ۷٪ بسازند. سلول های خورشیدی حساس به رنگ تنها نمونه ای از فناوری نسل سوم سلول های خورشیدی است که تاکنون به مرحله تجاری سازی رسیده است [۳۱].

معمولا سلول های خورشیدی حساس به رنگ از یک آند حساس به نور، کاتد و الکترو لیت ساخته می شود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، اساس کار سلول های حساس به رنگ به شرح زیر است:



شکل ۴ شماتیکی از سلول خورشیدی حساس به رنگ به همراه مکانیسم اتفاق افتاده [۳۲]

سلول های خورشیدی حساس به رنگ از قسمت های مختلف تشکیل شده است که هر یک از این قسمت ها در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۱-۱ شیشه پوشیده شده با اکسید رسانای شفاف

شیشه پوشیده شده با اکسید رسانای شفاف^۳ (TCO) به عنوان بستر برای فتوالکترو دیتانیوم دی اکسید و الکترو د شمارشگر استفاده می شود. این

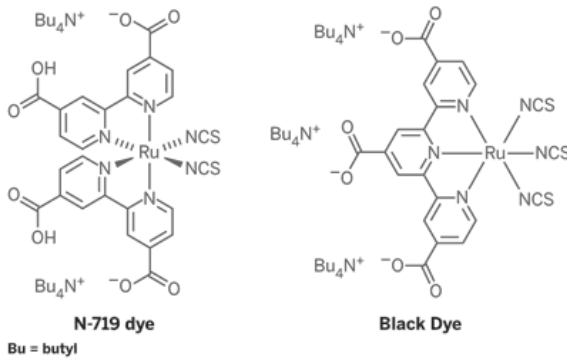
^۱ Vogel

^۲ Gratzel

^۳ Transparent Conducting Oxide

4 Indium-Tin Oxide
5 Fluorine_Tin Oxide
6 Gallium Dopped Zinc Oxide
7 Dopped
8 TiO₂





شکل ۵ شماتیکی از مولکول N719 [۴۲]

البته از رنگ های دیگری هم به عنوان ماده حساس به نور استفاده می شود ولی به دلیل قیمت پایین تر N719 نسبت به دیگر رنگ ها استفاده آن رایج می باشد.

۴-۱-۴ الکترولیت اکسایش_کاهش

این قسمت از سلول های خورشیدی حساس به رنگ به منظور تکمیل کننده چرخه انتقال الکترون تعبیه شده است. بدین گونه که الکترون ها را بین فتوالکترو د تیتانیوم دی اکسید و الکترو د شمارشگر جابجا میکند. تاکنون الکترولیت های گوناگونی بدین منظور استفاده شده است که می توان به یدید/تری یدید [۴۳]، برمید/برم [۴۳]، ساکسینو نیتریل [۴۴]، پلی اتیلن گلایکول [۶۱] اشاره کرد.

الکترولیت سلول های خورشیدی حساس به رنگ عمدتاً از الکترولیت های آلی مایع می باشند. این نوع از الکترولیت ها پایداری بسیار کمی دارند. علت اصلی این مشکل به فراریت آنها بر می گردد [۴۵]. برای حل این مشکل راه کارهای زیادی ارائه شده است که می توان به استفاده از الکترولیت های جامد و یا شبه جامد به جای الکترولیت های آلی مایع اشاره کرد. الکترولیت های جامد و شبه جامد شامل الکترولیت های پلیمری [۴۶ و ۴۷]، الکترولیت های ژل مانند [۴۸-۵۱]، مواد آلی حاوی حفره های انتقالی [۵۲ و ۵۳]، مایعات یونی [۵۴-۵۶]، کریستال های پلاستیکی [۶۰-۵۷] و غیره هستند.

۴-۱-۵ الکترود شمارشگر (کاتد)

این قسمت از سلول خورشیدی به منظور کاهش الکترولیت در آن (الکترو د شمارشگر) بکار گرفته شده است. بدین منظور باید فعالیت کاتالیزوری الکترو د شمارشگر بسیار بالا باشد. تاکنون مواد گوناگونی برای ساخت این نوع الکترو د بکار گرفته شده است که در جدول ۴ مهمترین الکترو د ها بر اساس بازده و کارایی نشان داده شده است:

جدول ۲ بررسی بازده و کارایی آند های بکار رفته در سلول های خورشیدی حساس به رنگ [۳۶ و ۳۷]

نام ماده	بازده (η %)	کارایی (FF %)	ناحیه فعال (cm^2)
Pure SnO ₂	۳/۲۰	۶۹/۶۸	۰/۲۱
Ni-doped SnO ₂	۳/۶۰	۶۸/۷۴	۰/۲۵
Zn-doped SnO ₂	۴/۲۰	۶۶/۷۴	۰/۲۵
Graphene-doped TiO ₂	۶/۹۷	۶۲/۰۰	۰/۲۵

۴-۱-۳ رنگ های حساس به نور

معمولاً در بیشتر بررسی ها روی سلول های خورشیدی حساس شده با رنگ، کمپلکس های روتنیوم پلی پیریدین^۱ به عنوان رنگ حساس به نور انتخاب می شوند. دلیل این انتخاب شناخت گسترده ویژگی های فیزیک نوری و اکسایش-کاهش نوری ترکیب ها این کمپلکس ها می باشد [۳۸].

اغلب در بیشتر این نوع سلول ها از رنگ هایی استفاده می شود که Ru اتم اصلی آنها می باشد. چرا که این عنصر به راحتی با تیتانیوم دی اکسید کمپلکس تشکیل می دهد و به این شکل پیوندهای محکمی با تیتانیوم دی اکسید برقرار می کند به طوری که پس از لایه نشانی، حتی با شستن TiO₂ رنگ پاک نمی گردد [۴۲].

تاکنون مطالعات زیادی بر روی بیش از ۲۰۰ نوع رنگدانه صورت گرفته است [۲۹]. مهمترین این رنگ ها از نظر بازده و فراوانی در جدول ۳ نشان داده شده است.

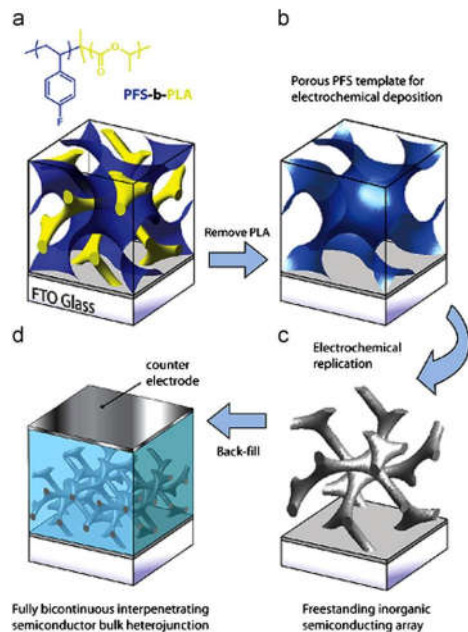
جدول ۳ بررسی بازده و کارایی رنگ های بکار رفته در سلول های خورشیدی حساس به رنگ [۴۰ و ۴۱]

نام رنگ	بازده (η %)	کارایی (FF %)
N3	۸/۲	۷۱
N719	۱۰/۱	۷۲
N749	۱۰/۴	۶۵
Z907	۷/۰	۶۹
K51	۷/۷	۷۲
K68	۷/۶	۶۹

تحقیقات نشان داده است که در اکثر سلول های خورشیدی حساس به رنگ از رنگدانه سیاه (N 719) استفاده شده است. در شکل ۵ شماتیکی از این رنگ دانه نشان داده شده است.



¹ Ruthenium Polypyridine



شکل ۶ ساختار جدید ساخته شده برای یک سلول خورشیدی حساس به رنگ [۶۷]

۴-۱-۲ ساخت رنگدانه هایی با کارایی بالا

اخیرا آقای کیم^۴ و همکارانش یک روش مصنوعی از رنگ دانه های آلی به منظور افزایش ولتاژ نوری در سطح سلول های خورشیدی حساس به رنگ یافته اند. آنها رنگ دانه های آلی را با گروه های غیر مسطح فضایی بکار گرفتند و ثابت کردند که هندسه غیر مسطح در رنگ دانه های آلی یکی از عوامل مهمی است که ولتاژ نوری را تحت تاثیر قرار می دهد [۶۸].

امروزه شاید استفاده از رنگ های طبیعی به عنوان حساس کننده در سلول های خورشیدی حساس به رنگ می تواند جایگزین مناسبی برای رنگ های آلی گران قیمت و کمیاب باشد زیرا رنگ های طبیعی نسبت به رنگ های آلی با محیط زیست سازگارترند، هزینه تولید کمی دارند و روش آماده سازی آنها ساده بوده و تنوع آنها گسترده تر از رنگ های آلی است. اما بازده رنگ های طبیعی نسبت به رنگ های آلی کم می باشد که باید مورد تحقیق و بررسی بیشتر قرار بگیرد [۶۹].

سلول های خورشیدی حساس به رنگ با وجود مقدار کارایی میانگین کم بدست آمده و مشکلات پایداری مزیت های متعددی از قبیل: هزینه کم، وزن سبک و ساخت راحت دارند. اما آنچه بر اهمیت آنها می افزاید، قابلیت حل شدن مواد مورد استفاده در حلال های آلی می باشد که تهیه سلول های خورشیدی انعطاف پذیر را امکان پذیر می سازد [۷۰].

۴-۲ سلول های خورشیدی پلیمری

در سال ۲۰۰۰، هیگ^۵، مک دیارمید^۶، و شیراکاوا^۷، جایزه نوبل شیمی را به خاطر "کشف و توسعه رفتار هدایتی پلیمرها" دریافت کردند، که این کشف باعث بوجود آمدن نوع جدیدی از سلول های خورشیدی شد. این سلول ها، که به سلول های خورشیدی پلیمری معروفند از نسل سوم سلول های خورشیدی

جدول ۴ بررسی بازده و کارایی الکتروود های شمارشگر [۶۴-۶۲]

نام ماده	بازده (% η)	کارایی (% FF)
Au Sputtered	۳/۷	۳۹
Au Nanoparticles	۱/۱	۲۳
Pt Nanoparticles	۳/۲	۳۱
AuPt Nanoparticles	۳/۴	۳۱
Pt	۸/۱۶	۶۱/۵۳
RuO ₂	۲/۳۶	۳۰/۹۸
RuO ₂ -RGO ^۱	۸/۳۲	۶۷/۳۳
Graphene Nanoplatelets (GN)	۲/۴۹	۵۲/۸۰
Graphene Nanoplatelet Aggregates (GNA)	۴/۲۶	۶۲/۵
Pt-GN	۴/۲۳	۵۱/۰
Pt-GNA	۶/۵۱	۶۱/۹

۴-۱-۶ مواد ضد نشت

در سلول های خورشیدی حساس به رنگ برای جلوگیری از نشت الکتروولیت و تبخیر حلال از مواد ضد نشت استفاده می شود. در انتخاب ماده ضد نشت، پایداری شیمیایی و فتوشیمیایی ماده ضد نشت باید با در نظر گرفتن در نوع الکتروولیت و حلال مورد توجه قرار گیرد.

۴-۱-۷ روش های پیشنهادی برای بهبود سلول های خورشیدی حساس به رنگ

در مطالعه سلول های خورشیدی حساس به رنگ مهمترین موضوعات عبارتند از: بهبود استحکام محیطی، شناسایی و توسعه رنگ دانه های جدید با بازده بالا همراه با الکتروولیت جامد. بطوری که تحقیق برای تولید رنگ دانه های جدید (به عنوان مثال رنگ دانه سیاه) همراه با کارایی بالا و همچنین بررسی استفاده از الکتروولیت جامد می تواند عواملی برای بهبود کارایی این نوع از سلول ها باشند [۶۶و۶۵].

۴-۱-۷-۱ طراحی و توسعه ساختارهای جدید

طراحی و توسعه ساختارهای جدید برای این نوع از سلول ها به منظور کاهش هزینه تولید، به عنوان یکی از راهکار هایی است که برای افزایش بازده DSSCs مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از این ساختارها، ساختار های خود مونتاژ^۲ می باشند. نحوه ساخت این سلول ها همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است با دو پلیمر آغاز می شود که یکی به شکل جاپرود^۳ بوده و دیگری فضای اطراف جاپرود را پر می کند [۶۷].

^۴ KIM

^۵ Heeger

^۶ Mac Diarmid

^۷ Shirakawa

^۱ Reduced Graphene Oxide

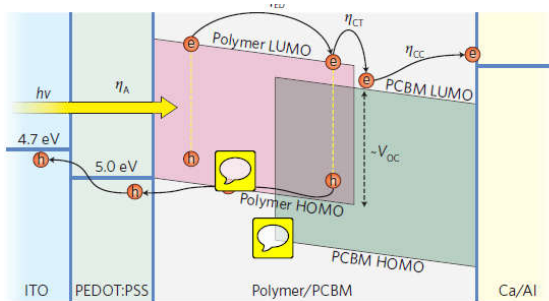
^۲ Self Assemble

^۳ A gyroid is an infinitely connected triply periodic minimal surface



در شکل ۸ اساس کار سلول های خورشیدی پلیمری نشان داده شده است. می توان مکانیسم این سلول را به صورت زیر خلاصه نمود:

- (۱) جذب فوتون که منجر به یک حالت نور تحریکی می شود
- (۲) تولید یک جفت حفره - الکترون (اکسایتون)
- (۳) جدایی بار با نفوذ اکسایتون به ناحیه هایی که در آنجا تفکیک می شود
- (۴) انتقال بار از درون نیمه هادی به الکترودهای مربوطه [۸۳]



شکل ۸ شماتیکی از اساس سلول های خورشیدی پلیمری [۸۳]

در طول دهه گذشته جذب بالای سلول های خورشیدی پلیمری به طور فزاینده ای مورد توجه حوزه علم بوده است [۷۸-۸۶ و ۸۳]. افزایش تعداد نشریات علمی از سال ۱۹۹۰ تاکنون نشان دهنده واقعیت این امر می باشد [۸۷]. در واقع افزایش تحقیقات و بررسی ها در این زمینه باعث افزایش بهبود راندمان تبدیل انرژی این نوع از سلول های خورشیدی طی دو دهه گذشته شده است. بطوریکه این میزان راندمان به حدود ۹٪ رسیده است [۹۱-۸۸].

۴-۳ سلول های خورشیدی مبتنی بر کریستال مایع

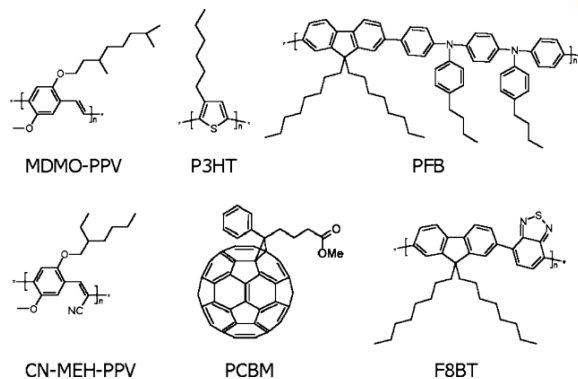
تبدیل انرژی از نور به الکتریسیته با استفاده از نیمه هادی های آلی نیازمند اجرای فرآیندهایی کارآمد توسط دستگاه های فوتولتائیک می باشد. از جمله این فرآیندها می توان به جذب فوتون های خورشیدی، مهاجرت اکسایتون به یک محل جدا (مانند فصل مشترک بین اهدا کننده و پذیرنده مواد) و حمل و نقل بار به الکترودها اشاره کرد [۹۴ و ۹۵].

در نمونه ای از سلول های خورشیدی از دیسک های کریستالی مایع برای ساخت سلول ها استفاده شده است که حامل های بار آن تحرک بالایی دارند. این سلول ها از مولکول های دیسک مانند بسیار منظم از فاز کریستال مایع^۹ تشکیل شده است. به این نوع از سلول ها، سلول های خورشیدی مبتنی بر کریستال مایع گفته می شود [۹۴-۹۷].

گروهی از این کریستال های مایع می توانند به صورت حالت ستونی وجود داشته باشند. حالت ستونی حالتی است که مولکول های تشکیل دهنده کریستال مایع (که می توان آنها را به دیسکی تشبیه کرد) روی هم قرار گرفته و ستون هایی را تشکیل دهند [۹۸-۹۹]. در ابتدا این گروه از کریستال های مایع، کریستال های مایع دیسکی نامیده می شدند. زیرا هر ستون از روی هم چیده شدن صفحات دیسک مانند مولکول ها روی هم تشکیل می شد. تحقیقات اخیر نشان داده است که برخی از کریستال های مایع ستونی از واحد های غیر دیسکی نیز ساخته می شوند در نتیجه بهتر است که به این گروه از مواد، کریستال های مایع ستونی گفته شود (شکل ۹) [۹۹].

می باشند که به صورت فیلم نازک ساخته شده و ساختار آنها بر پایه پلیمرهای مزدوج نیمه هادی می باشد [۷۴-۷۱].

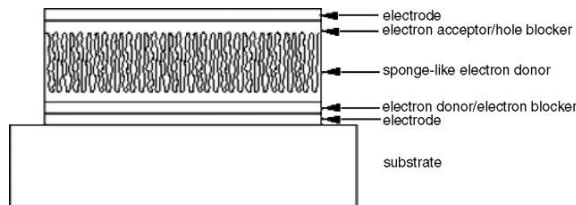
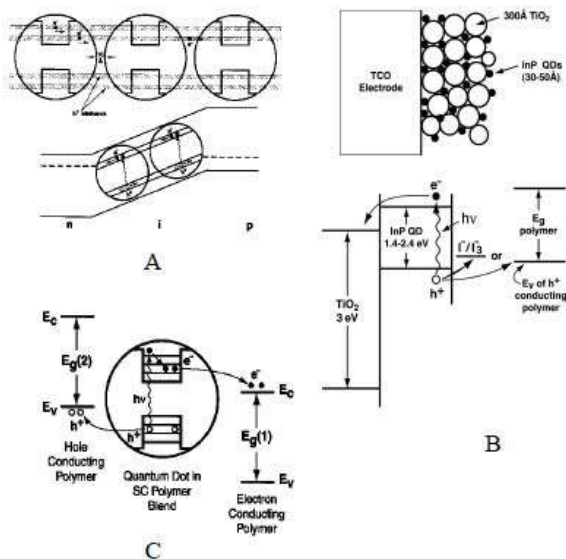
مدل این پلیمرها عموماً یک ساختار متناوب تک باند و دو باند (ترکیبی) بر اساس اتم کربن SP² هیبریدی ارائه شده است که این مدل باعث ایجاد یک سیستم π-π* الکترونی با قطبش الکترونیکی بزرگ می شود، بطوری که این مدل، پلیمرها را برای جذب نور مرئی در هر دو طرف خود قادر می سازد. دلیل این امر انتقال بار الکترونیکی π-π* بین اوربیتال پیوند، اوربیتال ضد پیوند و اوربیتال های Pz می باشد. اما این مدل نیازمند یک نیمه هادی مناسب برای تولید انرژی در سلول های خورشیدی است [۷۵]. تحرک حامل های بار در نیمه هادی های آلی به طور کلی بسیار کمتر از همتایان معدنی خود می باشد [۷۶]. اما به خاطر جذب بالای نور [۷۷ و ۷۸] و عمر طولانی حامل های بار [۷۹ و ۸۰]، این نقطه ضعف کم تر به چشم می آید. در تحقیقات انجام شده بر روی این نوع از سلول های خورشیدی، نتایج نشان می دهد که تحرک حامل های بار به دست آمده در سلول های پلیمری و فیلم های فلورنی^۱، هم اندازه و یا بزرگتر از تحرک حامل های بار بدست آمده در همتایان معدنی همچون سلول های سیلیکونی آمورف می باشد [۸۱ و ۸۲]. شکل ۷ سه نوع از مهمترین و متداولترین پلیمرهایی که اساس سلول های خورشیدی را تشکیل می دهند را نشان می دهد. این پلیمرها به دو دسته تقسیم می شوند. اولین دسته، پلیمرهای دهنده الکترون هستند که از جمله آنها می توان به MDMO_PPV^۲، P3HT^۳ و PFB^۴ اشاره نمود. دسته دوم شامل پلیمرهای پذیرنده الکترون می باشند که پلیمرهای CN_MEH_PPV^۵، PCBM^۶ و F8BT^۷ جزو دسته دوم محسوب می شوند. تمامی این پلیمرها به خاطر انحلال پذیری زنجیره های جانبی و عملکرد بالا، در الکترومینیوسانس نوری^۸ از اهمیت ویژه ای برخوردارند [۷۴].



شکل ۷ نمونه ای از پلیمر های بکار رفته در سلول های خورشیدی پلیمری [۷۴]

¹ Fullerene
² Poly[2-methoxy-5-(3,7-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene]
³ Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)
⁴ Poly[9,9-dioctylfluorene-co-bis-N,N-(4-butylphenyl)-bis-N,N-phenyl-1,4-phenylenediamine]
⁵ Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-(1-cyanovinylene)-phenylene]
⁶ [6,6]-phenyl C61-butyric acid methylester
⁷ Poly(9,9-dioctylfluorene-co-benzothiadiazole)
⁸ Photo-Electroluminescence

⁹Discotic

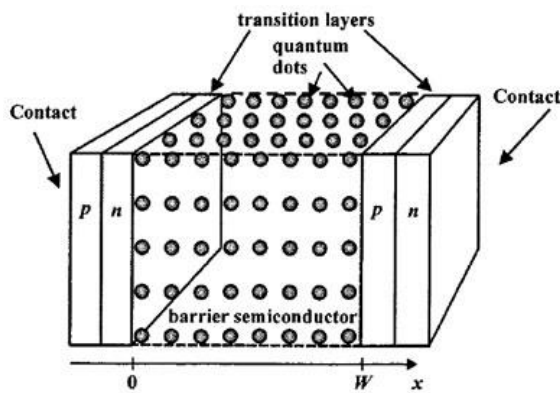


شکل ۹ شماتیکی از سلول خورشیدی مبتنی بر کریستال مایع [۹۹]

۴-۴ سلول های خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی

یک فاکتور محدود کننده برای بازده تبدیل انرژی در سلول های خورشیدی، این است که انرژی فوتون جذب شده توسط نیمه هادی ها در اثر اندرکنش الکترون - فوتون به صورت گرما تلف می شود. در سال های اخیر روش هایی برای کاهش این تلفات با استفاده از ساختارهای کوانتومی از جمله چاه های کوانتومی و نقاط کوانتومی ارائه شده است [۱۰۰].

شکل ۱۰ تصویری از سلول های خورشیدی میان باندی نقطه کوانتومی^۱ را نشان می دهد که جدیدترین نوع سلول های خورشیدی برای دستیابی به حداکثر راندمان ممکن هستند. زیرا تبدیل فوتون به انرژی الکتریکی این نوع از سلول ها چیزی در حدود ۶۳٪ می باشد و بیشترین بازده را در میان انواع سلول های خورشیدی دارا می باشند [۱۰۲]. این نوع از سلول ها شاخه ای از نسل سوم سلول های خورشیدی را تشکیل می دهند. ساختارهای نقطه کوانتومی در سلول های میان باندی نقطه کوانتومی، برای رسیدن به حداکثر راندمان نقش مهمی را ایفا می کنند.



شکل ۱۰ سلول خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی [۱۰۳]

برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ ویکتور کلیموف^۲، نخستین اثبات تجربی را ارائه کرد که نشان داد نقاط کوانتومی مواد نیمه هادی می توانند به هنگام برخورد با فوتون های دارای سطح انرژی بالا (امواج فرابنفش)، یک یا تعداد بیشتری الکترون آزاد کنند (شکل ۱۱).

همانطور که در بخش های مختلف مقاله ذکر گردید، سلول های خورشیدی نسل های مختلف ساختار و عملکرد متفاوتی را دارا می باشند. بازدهی نسل های مختلف سلول ها در جدول ۵ به طور خلاصه با یکدیگر مقایسه شده است.

شکل ۱۱ ساختارهایی برای سلول های خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی (A) یک آرایه نقطه کوانتومی که به عنوان الکترود نوری برای فرآیند فوتوالکتروشیمیایی استفاده شده است (B) نقاط کوانتومی استفاده شده برای حساس سازی یک فیلم نانو بلوری TiO_2 (C) نقاط کوانتومی پراکنده شده در یک پلیمر نیمه هادی [۱۰۱]

۵- بحث و نتیجه گیری

یکی از مهمترین تکنولوژی هایی که امروزه به منظور کاهش مصرف سوخت های فسیلی و در نتیجه کاهش انتشار آلایندهای زیست محیطی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از سلول های خورشیدی است. در حال حاضر فناوری های مختلفی از جمله ساخت سلول ها بر پایه ویفرهای سیلیکونی و لایه نشانی نیمه هادی ها بر بسترها، در ساخت سلول های خورشیدی مورد استفاده قرار می گیرد. در تحقیق حاضر ضمن بررسی عملکرد سلول های خورشیدی نسل های مختلف، مزایا و معایب هر کدام مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خلاصه می توان گفت که در میان این سه نسل، سلول های خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی به دلیل جذب بالای امواج نور خورشید، بیشترین بازده را در مقایسه با دیگر سلول ها دارا می باشند. اما به دلیل اینکه تاکنون راهی برای تولید مقرون به صرفه این نوع از سلول ها یافت نشده، استفاده از این نوع سلول های فتوولتائیک به مرحله تجاری نرسیده است و تحقیقات در این زمینه در طی سال های اخیر به طوره گسترده ای در حال انجام است. سلول های نسل اول دارای بازده پایین تری نسبت به سلول های خورشیدی کوانتومی می باشند. اما به دلیل فراوانی مواد اولیه و در دسترس بودن تکنولوژی ساخت، اکثر سلول های تولید شده در جهان در این دسته قرار می گیرند. استفاده از سلول های نسل دوم علی رغم هزینه های بالای استحصال و ساخت، با موفقیت های زیادی در کاربردهای فضایی همراه بوده است. اما این نسل از سلول ها، بازده پایینی نسبت به نسل های اول دارند. همچنین نتایج حاصل نشان می دهد که سلول های خورشیدی نسل سوم هرچند در مقایسه با همتایان دیگر خود بازده بسیار کمتری دارند (به جز سلول های خورشیدی مبتنی بر نتقاط کوانتومی)، اما به دلیل هزینه ساخت پایین و همچنین قابلیت هایی مانند انعطاف پذیری، برای مصارف غیر صنعتی مناسب هستند.

¹ QD_IBSC

² Victor Klimov



جدول ۵ مقایسه عملکرد سلول های خورشیدی نسل های ۱ تا ۳

نسل سوم				نسل دوم					نسل اول	
کریستال مایع	کوانتومی	پلیمری	حساس به رنگ	مس ایندیوم دی سلنید	گالیم آرسناید	کادمیم تلوراید	سیلیکون پلی کریستالی	سیلیکون آمورف	سیلیکون کریستالی	
-	-	۸/۳	۱۳/۱	۱۰-۱۲	۱۵-۱۷	۸-۱۰	۱۴-۱۸	۶-۸	۲۰-۲۹	راندمان تایید شده در شرایط آزمایشگاهی استاندارد %
-	-	۱	۱-۵	۷-۱۱	۱۱-۱۲	۸-۱۱	۱۰-۱۴	۵-۸	۱۵-۲۳	راندمان مازولهای فتوولتائیک تجاری شده در شرایط آزمایشگاهی استاندارد %

۶- مراجع

[15] A. Terakaw, "Review of thin-film silicon deposition techniques for high-efficiency solar cells developed at Panasonic/Sanyo", Energy. Mater. Sol. Cells, Vol.50, pp. 441-444, 2013.

[16] I. Dharmadasa, "Latest developments in CdTe, CuInGa(Se)₂ and GaAs/AlGaAs thin film PV solar cells", Curr. Appl. Phys, Vol.9, pp. 72-86, 2009.

[17] M. Green, "Third generation photovoltaics: ultra-high conversion efficiency at low cost", Prog. Photovolt, Vol. 9, pp.123-135, 2001.

[18] A. Luque, A. Marti, "Ametallic intermediate and high efficiency solar cell", Prog. Photovolt, Vol.9, pp.73-86, 2001.

[19] Y. Makableh, R. Vasani, J. Sarker, A. Nusir, S. Seal, M. Manasreh, "Enhancement of GaAs solar cell performance by using a ZnO sol-gel anti-reflection coating", Energy. Mater. Sol. Cells, Vol.123, pp. 178-182, 2014.

[20] T. Wada, N. Kohara, T. Negami, M. Nishitani, "Chemical and structural characterization of Cu(In,Ga)Se₂ / Mo interface in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells", J. Appl. Phys, Vol. 35, pp. 1253-1256, 1996.

[21] A. Goetzberger, C. Hebling, H. W. Schock, "Photovoltaic materials, history, status and outlook", Mater. Sci. Eng. Vol.40, pp. 1-46, 2003.

[22] D. Desai, S. Hegedus, B. McCandless, R. Birkmire, K. Dobson, D. Ryan, "How CDTE solar cells operate: determining collection using bifacial device characterization. Photovoltaic energy conversion", In: Proceedings of the conference record of the IEEE fourth world conference, pp. 368-371, 2006.

[23] J. Tang, Z. Huo, S. Brittan, H. Gao, P. Yang, "Solution-processed core-shell nanowires for efficient photovoltaic photovoltaic cells", Nat. Nanotechnol, Vol. 6, pp. 568-572, 2011.

[24] T. Todorov, O. Gunawan, S. J. Chey, T. G. de Monsabert, A. Prabhakar, D. B. Mitzi, "Progress towards marketable earth-abundant chalcogenide solar cells", Thin. Solid. Films, Vol. 519, pp. 7378-7381, 2011.

[25] D. Guimard, P. Grand, N. Bodereau, P. Cowache, J. F. Guillemoles, D. Lincot, "Copper indium diselenide solar cells prepared by electrodeposition", In: Proceedings of the photovoltaic specialists conference, conference record of the twenty-ninth IEEE, pp. 692-695, 2002.

[26] 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.

[27] G. Gordillo, C. Calderon, "CIS thin film solar cells with evaporated InSe buffer layers", Energy. Mater. Sol. Cells, Vol. 77, pp. 163-173, 2003.

[28] X. Wu, "High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells", Sol. Energy, Vol.77, pp. 803-814, 2010.

[29] N. Romeo, A. Bosio, V. Canevari, A. Podesta, "Recent progress on CdTe/CdS thin film solar cells", Sol. Energy, Vol.77, pp. 713-720, 2007.

[1] H. Imahori, T. Umeyama, S. Ito, "Large π -aromatic molecules as potential sensitizers for highly efficient dye-sensitized solar cells", Accounts. Chem. Res, Vol. 42, pp. 1809-1818, 2009.

[2] N. Asim, K. Sopian, Sh. Ahmadi, K. Saeedfar, M.A. Alghl, O. Saadatian, S. Zaidi, "A review on the role of materials science in solar cells", Renew. Sust. Energ. Rev, Vol. 21, pp. 421-431, 2013.

[3] Sh. Liu, X. Niu, W. Shan, W. Lu, J. Zheng, Y. Li, H. Duan, W. Quan, W. ZhiHan, C.R. Wronski, D. Yang, "Improvement of conversion efficiency of multicrystalline silicon solar cells by incorporating reactive ion etching texturing", Energy. Mater. Sol. Cells, Vol.127, pp. 21-26, 2014.

[4] M. Olivia, "Fundamentals of photovoltaic materials", National Solar Power Research Institute, 1998.

[5] P. Chen, X. Yu, L. Chen, D. Yang, "Formation of shallow junctions in gallium and phosphorus compensated silicon for cell performance improvement", Scr. Mater, Vol.65, pp. 871-874, 2011.

[6] R. M. Swanson, "Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells", conference record of the thirty-first IEEE, pp. 889-894, 2005.

[7] F. Torregrosa, C. Laviron, H. Faik, D. Barakel, F. Milesi, S. Beccaccia, "Realization of ultra shallow junctions by PIII: application to solar cells", Surf. Coat. Technol, Vol.186, pp. 93-98, 2004.

[8] M. A. Green, J. Hansen, "crystalline silicon solar cells", photovoltaics special research centre, Chapter 4, university of new south wales, Sydney, 2001.

[9] M. A. Green, "Catalogue photovoltaic drawings", photovoltaics special research centre, university of new south wales, Sydney, 1998.

[10] M. Abbott, J. R. Cotter, "Optical and electrical properties of laser texturing for high efficiency solar cells", Prog. Photovolt, Vol.14, pp. 225-235, 2006.

[11] S. Wagner, D. Carlson, H. Branz, "Amorphous and microcrystalline silicon solar cells", To be presented at the Electrochemical Society International Symposium Seattle, pp. 538-552, 1999.

[12] 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.

[13] J. Yang, A. Banerjee, S. Guha, "Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial and 13.0% stable conversion efficiencies", Appl. Phys. Lett, vol.70, pp.2975-2985, 1997.

[14] CH. Xiao, X. Yu, D. Yang, D. Que, "Impact of solar irradiance intensity and temperature on the performance of compensated crystalline silicon solar cells", Sol. Energy, vol. 80, pp. 650-667, 2013.



- polythiophene hole conductors", *Energy. Mater. Sol. Cells*, Vol. 88, pp. 11-21, 2005.
- [52] S. Zakeeruddin, M. Gratzel, "Solvent-free ionic liquid electrolytes for mesoscopic dye-sensitized solar cells", *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 19, pp. 2187-2202, 2009.
- [53] N. Jeon, D. Hwang, Y. Kang, S. Im, D. Kim, "Quasi-solid-state dye-sensitized solar cells assembled with polymeric ionic liquid and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) counter electrode", *Electrochem. Commun.*, Vol. 34, pp. 1-4, 2013.
- [54] F. Fabregat-Santiago, J. Bisquert, E. Palomares, L. Otero, D. Kuang, S. Zakeeruddin, M. Gratzel, "Correlation between photovoltaic performance and impedance spectroscopy of dye-sensitized solar cells based on ionic liquids", *J. Phys. Chem. A*, Vol. 111, pp. 6550-6560, 2007.
- [55] P. Wang, Q. Dai, S. Zakeeruddin, M. Forsyth, D. MacFarlane, M. Gratzel, "Ambient temperature plastic crystal electrolyte for efficient, all-solid-state dye-sensitized solar cell", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 126, pp. 13590-13591, 2004.
- [56] Q. Dai, D. MacFarlane, P. Howlett, M. Forsyth, "Rapid I-1/3 diffusion in a molecular-plastic-crystal electrolyte for potential application in solid-state photoelectrochemical cells", *Angew. Chem. Int. Edit.*, Vol. 44, pp. 313-316, 2005.
- [57] D. Hwang, D. Kim, S. Jo, V. Armel, D. MacFarlane, D. Kim, S. Jang, "Highly Efficient Plastic Crystal Ionic Conductors for Solid-state Dye-sensitized Solar Cells", *Sci. Rep.*, Vol. 3, pp. 303-308, 2013.
- [58] Y. Jiang, Y. Cao, P. Liu, J. Qian, H. Yang, "Plastic-polymer composite electrolytes for solid state dye-sensitized solar cells", *Electrochimica. Acta*, Vol. 55, pp. 6415-6419, 2010.
- [59] J. Gong, K. Sumathy, J. Liang, "Polymer electrolyte based on polyethylene glycol for quasi-solid state dye sensitized solar cells", *Renew.Sust. Energ. Rev.*, Vol. 59, pp. 419-423, 2012.
- [60] V. Dao, Y. Choi, K. Yong, L. Larina, O. Shevaleevskiy, H. Choi, "A facile synthesis of bimetallic AuPt nanoparticles as a new transparent counter electrode for quantum-dot-sensitized solar cells", *J. Power. Sources*, Vol. 274, pp. 831-838, 2015.
- [61] V. Dao, L. Larina, J. Lee, K. Jung, B. Huy, H. Choi, "Graphene-based RuO₂ nanohybrid as a highly efficient catalyst for triiodide reduction in dye-sensitized solar cells", *Carbon*, Vol. 82, pp. 895-905, 2014.
- [62] H. Hoshi, Sh. Tanaka, T. Miyoshi, "Pt-graphene electrodes for dye-sensitized solar cells", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 190, pp. 47-51, 2014.
- [63] G. Hashmi, K. Miettunen, T. Peltola, J. Halme, I. Asghar, K. Aitola, "Review of materials and manufacturing options for large area flexible dye solar cells", *Renew.Sust. Energ. Rev.*, Vol. 15, pp. 3717-3732, 2011.
- [64] J. Yoon, D. K. Kang, J. Y. Park, Y. S. Kang, "Dye-sensitized solar cells using ion-gel electrolytes for long-term stability", *J. Power Sources*, Vol. 201, pp. 395-401, 2012.
- [65] E. J. W. Crossland, M. Kamperman, M. Nedelcu, C. Ducati, U. Wiesner, D. M. Smilgies, "A bicontinuous double gyroid hybrid solar cell", *Nano. Lett.*, Vol. 9, pp. 2807-2812, 2009.
- [66] M. J. Kim, Y. J. Yu, J. H. Kim, Y. S. Jung, K. Y. Kay, S. B. Ko, "Tuning of spacer groups in organic dyes for efficient inhibition of charge recombination in dye-sensitized solar cells", *Dyes. Pigments*, Vol. 95, pp. 134-41, 2012.
- [67] M. R. Narayan, "Review: dye sensitized solar cells based on natural photo-sensitizers", *Renew.Sust. Energ. Rev.*, Vol. 25, pp. 3525-3539, 2011.
- [68] M. Stella, "Study of organic semiconductors for device applications", *Barcelona*, Ph.D. Thesis, 2009.
- [69] H. S. Nalwa, "Handbook of organic conductive molecules and polymers", Vol. 1-4, Wiley, 1997.
- [70] G. Hadziioannou, P. F. van Hutten, "Semiconducting polymers", Vol. 1. Wiley-VCH, 2000.
- [71] T. A. Skotheim, J. R. Reynolds, "Handbook of conducting polymers", Vol. 1-2, 2006.
- [72] H. Hoppe, N. Serdar Sariciftci, "Polymer Solar Cells", *Adv. Polym. Sci.*, Vol. 214, pp. 1-86, 2008.
- [73] M. D. McGehee, E. K. Miller, D. Moses, A. J. Heeger, P. Bernier, S. Lefrant, G. Bidan, "Advances in synthetic metals: twenty years of progress in science and technology", Elsevier, vol. 98, 1999.
- [74] C. D. Dimitrakopoulos, D. J. Mascaro, "Organic thin-film transistors: a review of recent advances IBM", *J. Res. Dev.*, Vol. 45, pp. 11-16, 2001.
- [75] H. Hoppe, N. Arnold, D. Meissner, "Sariciftci NS Modeling the optical absorption within conjugated polymer/fullerene-based bulk-
- [30] B. O'Regan, M. Graetzel, "A low-cost, high-efficiency solar-cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films", *Nature*, Vol. 353, pp. 737-740, 1991.
- [31] I. Chung, B. Lee, J. He, R. PH. Chang, M. G. Kanatzidis, "All-solid-state dye-sensitized solar cells with high efficiency", *Nature*, Vol. 485, pp. 486-489, 2012.
- [32] B. Basheer, D. Mathew, B. George, R. Nair, "An overview on the spectrum of sensitizers: The heart of dye sensitized solar cells", *Sol. Energy*, Vol. 108, pp. 479-507, 2014.
- [33] K. Pettersso, H. Pettersson, "Dye-Sensitized Solar Cells", *Anders. Chem. Rev.*, Vol. 110, pp. 6595-6663, 2010.
- [34] S. Sheehan, "Flexible glass substrate based dye sensitized solar cells", *Energy. Mater. Sol. Cells*, Vol. 132, pp. 237-244, 2015.
- [35] A. Amala Rani, S. Ernest, "Structural, morphological, optical and compositional characterization of spray deposited Ga doped ZnO thin film for dye-sensitized solar cell application", *Method. Enzymol.*, Vol. 67, pp. 398-408, 2014.
- [36] K. Hara, H. Arakawa, A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of photovoltaic science and engineering (Chapter 15: Dye-sensitized Solar Cells)", 2003.
- [37] A. Shalan, M. Rasly, I. Osama, M. Rashad, I. Ibrahim, "Photocurrent enhancement by Ni²⁺ and Zn²⁺ ion doped in SnO₂ nanoparticles in highly porous dye-sensitized solar cells", *Ceramics. International*, Vol. 40, pp. 11619-11626, 2014.
- [38] N. Yang, "Two-dimensional grapheme bridges enhanced photoinduced charge transport in dye sensitized solar cells", *ACS. Nano*, Vol. 42, pp. 887-894, 2010.
- [39] V. Fthenakis, "Sustainability of photovoltaics: the case for thin-film solar cells", *Renew.Sust. Energ. Rev.*, Vol. 13, pp. 2746-2750, 2009.
- [40] Q. Wang, S. M. Zakeeruddin, M. K. Nazeeruddin, R. Humphry-Baker, M. Graetzel, "Molecular wiring of nanocrystals: NCS-enhanced cross-surface charge transfer in self-assembled Ru-complex monolayer on mesoscopic oxide films", *J. Am. Chem.*, Vol. 128, pp. 4446-4457, 2006.
- [41] K. Daibin, K. Cedric, S. Henry, H. Baker, R. Zakeeruddin, M. Shaik, M. Graetzel, "A new ion coordinating ruthenium sensitizer for mesoscopic dye-sensitized solar cells", *Inorg. Chim. Acta*, Vol. 361, pp. 699-709, 2008.
- [42] J. L. Yang, W. W. F. Leung, J. Wang, "Improvement in light harvesting in a dye sensitized solar cell based on cascade charge transfer", *Nanoscale*, Vol. 5, pp. 7493-7498, 2013.
- [43] X. Zu., Y. Gui, Y. Jiang, X. Ai, H. Yang, Y. Cao, "Organic alloy electrolytes for thermostable solid-state dye-sensitized solar cells", *Electrochimica. Acta*, Vol. 147, pp. 535-539, 2014.
- [44] K. Kim, M. Lee, H. Kim, G. Lim, Y. Choi, N. Park, K. Kim, W. Lee, "Formation of highly efficient dye-sensitized solar cells by hierarchical pore generation with nanoporous TiO₂ spheres", *Adv. Mater.*, Vol. 21, pp. 3668-3673, 2009.
- [45] H. Wang, H. Li, B. Xue, Z. Wang, Q. Meng, L. Chen, "Solid-state composite electrolyte LiI/3-hydroxy propionitrile/SiO₂ for dye-sensitized solar cells", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 127, pp. 6394-6401, 2005.
- [46] J. Wu, S. Hao, Z. Lan, J. Lin, M. Huang, Y. Huang, P. Li, S. Yin, T. Satot, "An all-solid-state dye-sensitized solar cell-based poly(N-alkyl-4-vinyl-pyridine iodide) electrolyte with efficiency of 5.64%", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 130, pp. 140-148, 2008.
- [47] P. Wang, S. Zakeeruddin, J. Moser, M. Nazeeruddin, T. Sekiguchi, M. Gratzel, "A stable quasi-solid-state dye-sensitized solar cell with an amphi-philic ruthenium sensitizer and polymer gel electrolyte", *Nat. Mater.*, Vol. 2, pp. 402-407, 2003.
- [48] K. Chen, C. Liu, C. Hsieh, C. Lin, K. Huang, C. Tsai, F. Chen, "New fabrication process of long-life dye-sensitized solar cells by in situ gelation of quasi-solid polymer electrolytes", *J. Power. Sources*, Vol. 247, pp. 939-946, 2014.
- [49] R. Dong, S. Shen, H. Chen, C. Wang, P. Shih, C. Liu, R. Vittal, J. Lin, K. Ho, "A novel polymer gel electrolyte for highly efficient dye-sensitized solar cells", *J. Mater. Chem.*, Vol. 1, pp. 8471-8478, 2013.
- [50] U. Bach, D. Lupo, P. Comte, J. Moser, F. Weissortel, J. Salbeck, H. Spreitzer, M. Gratzel, "Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies", *Nature*, Vol. 395, pp. 583-585, 1998.
- [51] C. Zafer, N. Karapire, S. Sariciftci, S. Icli, "Characterization of N,N'-bis-2-(1-hydroxy-4-methylpentyl)-3,4,9,10-perylene bis(dicarboximide) sensitized nanocrystalline TiO₂ solar cells with



- [89] M. Reyes-Reyes, K. Kim, J. Dewald, R. S. Lopez, A. Avadhanula, S. Curran, D. L. Carroll, "Meso-structure formation for enhanced organic photovoltaic cells", *Org. Lett.*, Vol. 7, pp. 5749-5756, 2005.
- [90] G. Li, V. Shrotriya, J. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery, Y. Yang, "High efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends", *Nat. Mater.*, Vol. 4, pp. 864-871, 2005.
- [91] G. Li, R. Zhu, Y. Yang, "Polymer solar cells", *Nat. Photonics*, Vol. 6, pp. 153-159, 2012.
- [92] C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, J. C. Hummelen, "Plastic solar cells", *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 63, pp. 11-15, 2007.
- [93] J. M. Halls, C. A. Walsh, N. C. Greenham, E. A. Marseglia, R. H. Friend, S. C. Moratti, A. B. Holmes, "New physical insights of surfaces/interfaces for bilayer organic solar cells", *Nature*, Vol. 376, pp. 498-508, 1995.
- [94] G. Blasse, G. Dirksen, A. Meijerink, E. Neeleman, W. Drenth, "Optically active phthalocyanines", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 154, pp. 420-426, 1989.
- [95] D. Adam, P. Schuhmacher, J. Simmerer, J. Haussling, K. Siemensmeyer, K. Etzbach, H. Ringsdorf, D. Haarer, "Discotic liquid crystals – self organizing molecular wires", *Nature*, Vol. 371, pp. 141-148, 1994.
- [96] A. Lux, G. G. Rozenberg, K. Petritsch, S. C. Moratti, B. Holmes, R. H. Friend, "Liquid crystalline phthalocyanines in organic solar cells", *Synthetic. Met.*, Vol. 102, pp. 1776-1781, 1999.
- [97] X. Wang, G. I. Koleilat, J. Tang, H. Liu, I. J. Kramer, R. Debnath, "Tandem colloidal quantum dot solar cells employing a graded recombination layer", *J. Nat. Photon.*, Vol. 5, pp. 480-484, 2011.
- [98] Y. Bouligand, "Liquid crystalline phases given by helical biological polymers (DNA, PBLG and xanthan) Columnar textures", *J. Phys. ique*, Vol. 41, pp. 1307-1313, 1980.
- [99] M Carrasco-Orozco, W. C. Tsoi, M. O'Neill, M. P. Aldred, P. P Vlachos, S.M. Kelly, "new photovoltaic concept: liquid-crystal solar cells using a nematic gel template", *Adv. Mater.*, Vol. 18, pp. 1754–1758, 2006.
- [100] R. Raffaele, S. Castro, F. Hepp, Sh. Bailey, "Quantum Dot Solar Cells", *progress in photovoltaic: research and application Prog. Photovolt.*, Vol. 10, pp. 433-439, 2002.
- [101] A. Nozik, "Quantum dot solar cells", *Physica. E*, Vol.14, pp. 115 - 120, 2002.
- [102] Y. Hu, B. Wang, J. Zhan, T. Wang, R. Liu, J. Zhang, "Synthesis and Photoelectrochemical response of CdS quantum dot-sensitized TiO₂ nanorod array photoelectrodes", *Nano. Scale. Res. Lett.*, Vol. 8, pp. 222-229, 2013.
- [103] A. Marti, L. Cuadra, A. Luque, "Quasi-drift diffusion model for the quantum dot intermediate band solar cell", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 8, pp. 1632-1639, 2002.
- heterojunction organic solar cells", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells*, Vol. 80, pp. 105-111, 2003.
- [76] H. Hoppe, N. S. Sariciftci, "Organic solar cells: an overview", *J. Mater. Res.*, Vol. 19, pp. 1924-1930, 2004.
- [77] I. Montanari, A. F. Nogueira, J. Nelson, J. R. Durrant, C. Winder, M. A. Loi, N. S. Sariciftci, C. J. Brabec, "Transient optical studies of charge recombination dynamics in a polymer/fullerene composite at room temperature", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, pp. 3001-3010, 2001.
- [78] A. F. Nogueira, I. Montanari, J. Nelson, J. R. Durrant, C. Winder, N. S. Sariciftci, C. Sariciftci, "Charge recombination in conjugated polymer/fullerene blended films studied by transient absorption spectroscopy", *J. Phys. Chem. B*, Vol. 107, pp. 1567-1573, 2003.
- [79] J. Nelson, "Diffusion-limited recombination in polymer–fullerene blends and its influence on photocurrent collection", *Phys. Rev. B*, Vol. 67, pp. 155-209, 2003.
- [80] H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, B. M. W. Langeveld-Voss, A. J. H. Spiering, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Herwig, D. M. de Leeuw, "Two-dimensional charge transport in self-organized, high-mobility conjugated polymers", *Nature*, Vol. 401, pp. 685-693, 1999.
- [81] T. B. Singh, N. Marjanovic, G. J. Matt, S. Günes, N. S. Sariciftci, A. Montaigne Ramil, A. Andreev, H. Sitter, R. Schwodiaue, S. Bauer, "High-mobility n-channel organic field-effect transistors based on epitaxially grown C60 films", *Org. Electron.*, Vol. 6, pp. 105-115, 2004.
- [82] C. W. Tang, "Two-layer organic photovoltaic cell", *Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 183-188, 1986.
- [83] C. J. Brabec, V. Dyakonov, J. Parisi, N. S. Sariciftci, "Organic photovoltaics: concepts and realization", *Springer*, Vol. 60, pp. 654-660, 2003.
- [84] C. J. Brabec, "Organic photovoltaics: technology and market", *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells*, Vol. 83, pp. 273-278, 2004.
- [85] A. J. Mozer, N. S. Sariciftci, T. A. Skotheim, J. R. Reynolds "Conjugated polymers", *Mater. Res. Soc. Symp. P.*, Vol. 2, pp. 101-107, 2006.
- [86] A. D. Pasquier, H. E. Unalan, A. Kanwal, S. Miller, M. Chhowalla, "Conducting and transparent single-wall carbon nanotube electrodes for polymer–fullerene solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, pp. 203-212, 2005
- [87] W. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee, A. J. Heeger, "Thermally stable, efficient polymer solar cells with nanoscale control of the interpenetrating network morphology", *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 15, pp. 1617-1624, 2005.
- [88] M. Reyes-Reyes, K. Kim, D. L. Carroll, "High-efficiency photovoltaic devices based on annealed poly(3-hexylthiophene) and 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl- (6,6) C61 blends", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, pp. 506-514, 2005.

