



مروری بر انواع مختلف سلول های خورشیدی و مکانیزم عملکرد آنها

شعله کاظمی فرد^۱، لیلا ناجی^{۲*}، فرامرز افشار طارمی^۳، زهرا فخران^۴

۱ و ۴- دانشجوی دکتری، شیمی کاربردی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استادیار، شیمی تجزیه (الکتروشیمی)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- استاد، شیمی پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳، leilanaji@aut.ac.ir

چکیده

بحران انرژی یکی از مسائل مهم در دنیای امروز می باشد و کشورهای مختلف از راهکارهای متفاوتی برای حل این مسئله استفاده می کنند. منابع انرژی تجدیدناپذیر مانند سوخت های فسیلی به سرعت رو به اتمام است. استفاده از این منابع آلودگی های زیست محیطی بسیاری به همراه دارد که منجر به بروز پدیده گرمای جهانی می شود. از این رو تمایل به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی باد، انرژی خورشید و زمین گرمایی رو به افزایش بوده و سرمایه گذاری های کلانی در کشورهای پیشرفته بر روی این نوع از منابع انرژی انجام شده است. مقاله مروری حاضر به بیان خلاصه ای از انواع مختلف انرژی می پردازد و مختصر نگاهی به انرژی خورشید به عنوان یکی از مهمترین منابع انرژی تجدیدپذیر دارد. در این مقاله مروری سلول های خورشیدی به عنوان دستگاه های فوتولتائیک تبدیل کننده نور خورشید به جریان الکتریسیته معرفی شده و مطالب مفیدی در رابطه با انواع آنها به همراه مزایا و معایب نسبی، مکانیسم عملکرد، راهکارهای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و پیشرفت هایی که در این تکنولوژی حادث شده است ارائه گردیده است. سرانجام وضعیت بازار جهانی در ارتباط با این تکنولوژی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

کلیدواژگان: انرژی خورشیدی، سلول خورشیدی، فوتولتائیک، منابع تجدیدپذیر

Review on Different Types of Solar Cells and Their Performance Mechanism

Sholeh Kazemifard¹, Leila Naji^{2*}, Faramarz Afshar Taromi³, Zahra Fakharan⁴

1, 4- Department of Chemistry, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Chemistry, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3- Department of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, leilanaji@aut.ac.ir

Received: 16 December 2015 Accepted: 13 February 2016

Abstract

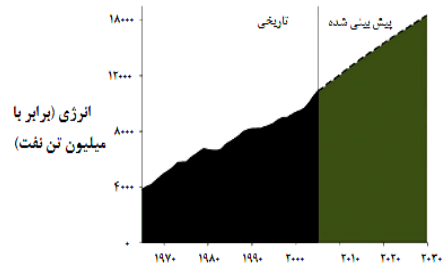
Today, energy crisis is one of the most important problems in the world and to overcome, different countries apply various solutions. Non-renewable resources of energy such as fossil fuels are going to end rapidly. Applying of non-renewable resources causes to environmental pollution and sequent global warming. Therefore tendency to apply renewable energy resources such as wind, solar energy, geothermal, etc. is increased around the world and government interested to invest on these types of energy. This review paper introduces briefly about all types of energy and especially on solar energy as the most important renewable resources. In this paper, solar cells as photovoltaic devices that convert solar energy to electricity are introduced, also different types of solar cells, advantages and disadvantages of each group, performance mechanism and finally some progress in solar cell technologies, is considered.

Keywords: Solar Energy, Solar Cell, Photovoltaic, Renewable Resources

۱- مقدمه

بدلیل افزایش جمعیت جهان و صنعتی شدن اکثر کشورها، مصرف انرژی جهان از اواسط قرن بیستم بطور چشمگیری بالا رفته است. مصرف نفت در طی دهه گذشته از ۵۰ میلیون بشکه در روز به ۷۵ میلیون بشکه افزایش یافته است. این امر منجر به افزایش قیمت نفت از ۱۵ دلار در هر بشکه در سال ۱۹۹۱ به ۷۰ دلار در سال ۲۰۱۰ رسید. روند رو به رشد مصرف سوخت‌های فسیلی از گذشته تا آینده در شکل ۱ نشان داده شده است.

مصرف انرژی جهانی



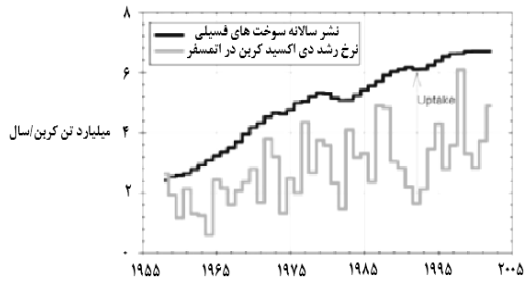
شکل ۱ روند مصرف منبع تجدیدناپذیر نفت در طول زمان^۱

بنابراین با توجه به افزایش قیمت نفت در بازارهای جهانی نیاز به تامین انرژی از منابع دیگر به طور چشمگیری احساس می‌شود. به طور عمده انرژی از دو منبع در دسترس با نام‌های انرژی تجدیدناپذیر و انرژی تجدیدپذیر^۳ تامین می‌گردد. منابع تجدید پذیر انرژی مانند انرژی خورشید، باد، جزر و مد و انرژی زمین گرمایی بی انتها بوده و محدودیت کاربری ندارند. درمقابل، به کارگیری منابع انرژی تجدید ناپذیر با کاهش و اتمام آن‌ها همراه است. میزان مصرف انواع مختلف انرژی در جهان در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲ میزان مصرف منابع انرژی موجود در جهان^۴

همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است ۸۸٪ مصرف انرژی جهان برپایه منابع تجدید ناپذیر استوار است. این امر می‌تواند در آینده‌ای نه چندان دور جهان را با بحران انرژی مواجه سازد. علاوه بر مسئله کمبود منابع سوخت‌های فسیلی و تجدید ناپذیر، آلاینده‌های منتشر شده در اثر مصرف این گروه از منابع انرژی مانند گازهای گلخانه‌ای منجر به اثر گرمای جهانی^۵ (گرم شدن تدریجی کره زمین) می‌گردد. در مقابل، منابع انرژی تجدیدپذیر هیچ نوع از گازهای گلخانه‌ای را به اتمسفر منتشر نمی‌کنند. شکل ۳ میزان انتشار آلاینده‌های ناشی از سوختن منابع فسیلی را در یک بازه زمانی مشخص نمایش می‌دهد.^۶

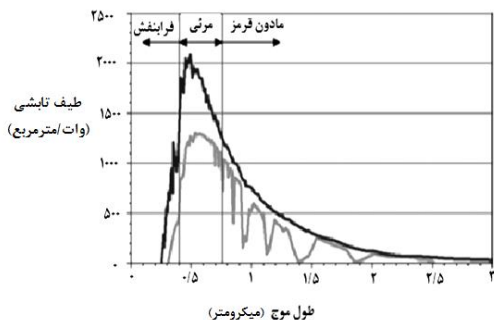


شکل ۳ نمودار میزان انتشار آلاینده از سوخت‌های فسیلی در طول زمان^۶

پیش‌بینی می‌شود که میزان تقاضای جمعیت جهانی به انرژی در سال ۲۰۵۰ به حدود ۱۳ تراوات برسد [۱]. دستاوردهای جدید بایستی توانایی پاسخگویی به این تقاضا را داشته باشند. از میان منابع انرژی تجدیدپذیر خورشید با یک ساعت تابش 1.0×10^3 کیلووات انرژی تولید می‌نماید که می‌تواند تقاضای انرژی مورد مصرف جهان به ازای هر سال (در سال ۲۰۰۵: 1.0×10^6 کیلووات) را تامین کند [۲]. تولید انرژی از طریق خورشید برای زمین بسیار عظیم است (سالانه معادل 3×10^{24} ژول). این مقدار ۱۰۰۰۰ برابر بیشتر از مقدار انرژی مصرفی توسط جمعیت جهان است. اگر تنها ۱٪ از سطح زمین با استفاده از سلول‌های خورشیدی با بازدهی ۱۰٪ پوشیده شود انرژی مورد نیاز جهان تامین می‌شود [۳]. بنابراین می‌توان با سرمایه‌گذاری و تجارت سالم در زمینه انرژی خورشیدی میزان سرمایه هزینه شده در این صنعت را با بالاترین سرعت بازگرداند.

۲-۱- مقدمه ای بر انرژی خورشیدی

خورشید یکی از منابع عظیم انرژی در جهان است. این ستاره از گازهای هیدروژن (۷۳/۴۶ درصد)، هلیوم (۲۴/۸۵ درصد) و عناصر دیگر تشکیل شده است. عمر این ستاره بیش از ۱۴ میلیارد سال است و تا ۵ میلیارد سال آینده بعنوان یک منبع عظیم انرژی به حساب می‌آید. میزان دما در مرکز خورشید حدود ۲۰ میلیون درجه کلوین و در سطح آن معادل با ۶۰۰۰ درجه کلوین است. اخیراً استفاده از منبع عظیم انرژی خورشید برای تولید انرژی الکتریسته، ایجاد گرمایش ساختمان‌ها، خشک کردن تولیدات کشاورزی شروع شده است [۴-۶]. شکل ۴ محدوده تحت پوشش تابش خورشید را نشان می‌دهد. نور خورشیدی محدوده فرابنفش تا زیرقرمز را پوشش می‌دهد. حدود ۴۰٪ از این انرژی در محدوده مرئی و حدود ۵۰٪ آن در محدوده زیرقرمز^۷ می‌باشد. فوتون‌ها در محدوده ی فرابنفش و مرئی انرژی لازم برای تهییج الکترون‌ها در مواد نیمه هادی را فراهم می‌آورند. این پدیده به طور مؤثر در تولید جریان الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۷-۱۰].



شکل ۴ طیف خورشید (خط سبز: AM 1.5 و خط قرمز: AM 0) [۷]

7. Infrared (IR)

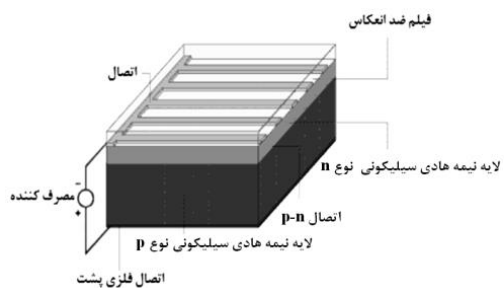
1. DeGroat, K., Systems Analysis and Recommendations for R&D and Accelerated Deployment of Solar Energy. November 2009
 2. Non-Renewable Energy
 3. Renewable Energy
 4. Energy, MONTANA department of commerce: US Department of Energy, Energy Infrastructure Promotion & Development Division
 5. Global Warming
 6. CO2 Now Online: Greenhouse Gas Watchdog

انتقال بارهای تفکیک شده به الکترودها از طریق مسیرهای انتقال بار است. اگر مسیر انتقال بار دارای نقص‌هایی مانند دام‌های بار یا سدهایی که از انتقال بار ممانعت می‌کنند باشد عملکرد مناسب سلول خورشیدی کاهش می‌یابد. هنگامی که فصل مشترک به درستی طراحی و بهینه نشده باشد منجر به هدررفت بار جمع آوری شده می‌گردد [۱۳].

۲-۲- نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی

پس از کشف اثر فوتولتائیک زمینه‌ی طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی فراهم شد. بررسی روند پیشرفت سلول‌های خورشیدی از گذشته تا امروز نشان می‌دهد که در طول زمان ترکیبات مختلفی که خصوصیات فوتولتائیک را از خود نشان می‌دهند طراحی و سنتز شده و در ساختار سلول‌های خورشیدی به کار گرفته شده‌اند. در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

اولین سلول خورشیدی سیلیکونی توسط آزمایشگاه بل در سال ۱۹۵۳ در آمریکا توسعه یافت. این دستگاه‌ها در آن زمان به بازده ۴/۵٪ رسیدند و اندکی بعد در سال ۱۹۵۴ به بازده ۶٪ دست یافتند [۱۴]. تحقیقات بسیاری پیرو این دستاورد جدید به انجام رسید زیرا سیلیکون ایمن بوده و دومین عنصر فراوان بر روی کره زمین می‌باشد. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی به عنوان اولین نسل از سلول‌های خورشیدی شناخته می‌شوند. این دستگاه‌ها به دلیل استفاده از سیلیکون خالص در ساختار بسیار گران قیمت هستند. این نوع از سلول‌های خورشیدی از یک تک اتصال برای استخراج انرژی از فوتون‌های خورشیدی ساخته شده‌اند و بازده آن‌ها تقریباً نزدیک به ماکزیمم بازده تئوری آن‌ها می‌باشد. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی در سال ۲۰۰۸ بر بیش از ۹۰٪ بازار فوتولتائیک جهان حکمفرما بودند [۱۵]. شکل ۶ ساختار یک سلول خورشیدی سیلیکونی را نشان می‌دهد.



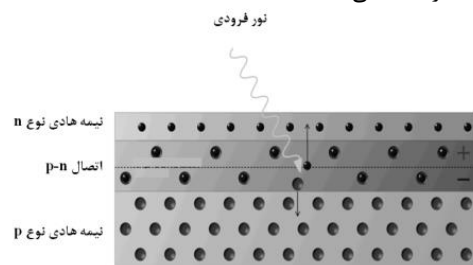
شکل ۶ شماتیکی از یک سلول خورشیدی سیلیکونی^۶

پیشرفت در جهت کاهش قیمت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به ساخت نسل دوم از این سلول‌ها منجر شد که شامل فیلم‌های نازک کادمیم تلوراید (CdTe)، کادمیم سولنید (CdSe)، مس ایندوم گالیم دی سولنید (CIGS)، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی آمورف و سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی لایه نازک^۷ می‌باشد. نسل دوم سلول‌های خورشیدی در مقایسه با نسل اول دارای بازده کمتر و در مقابل قیمت پایین‌تر هستند. این گروه از سلول‌های خورشیدی در سال ۱۹۹۰ و اوایل قرن حاضر بسیار مورد توجه قرار گرفتند. سلول‌های خورشیدی لایه نازک به منظور استفاده کمتر از مواد و در نتیجه قیمت پایین‌تر فرآیندهای ساخت طراحی گشتند.

کاربرد انرژی خورشید و استفاده بهینه از آن گامی مطمئن به سوی آینده‌ای است که مسئله بحران انرژی در آن حل می‌شود. از این رو در ادامه به معرفی سلول‌های خورشیدی که راهکاری اساسی در استفاده مؤثر از انرژی خورشید می‌باشند پرداخته می‌شود.

۲- پدیده‌ی فوتولتائیک و سلول‌های خورشیدی

سلول خورشیدی دستگاهی الکتریکی است که به واسطه اثر فوتولتائیک نور خورشید را با استفاده از یک نیمه رسانا به طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌نماید. به همین دلیل به سلول‌های خورشیدی، سلول‌های فوتولتائیک نیز گفته می‌شود. اثر فوتولتائیک توسط یک فیزیکدان تجربی فرانسوی بنام ادموند بکرل در سال ۱۸۳۹ در حالی که یک سلول الکترولیتی متشکل از دو الکتروده فلزی را مورد آزمایش قرار می‌داد کشف شد [۱۱]. در سال ۱۹۰۵ اینشتین اثر فوتولتائیک را که بر پایه درک تئوری اثر فوتولتائیک بود ارائه نمود. همانگونه که در شکل ۵ نمایش داده شده است در دستگاه‌های فوتولتائیک الکترون‌های حالت برانگیخته و حفرت تولید شده در حالت پایه باید به طور جداگانه برای تولید الکتریسیته جمع آوری شوند. اثر فوتولتائیک در اثر تماس دو نیمه‌هادی نوع n و نوع p ایجاد می‌شود. هنگامی که نیمه‌هادی نوع n در تماس با نیمه‌هادی نوع p قرار می‌گیرد در فصل مشترک آنها اتصال p-n تشکیل می‌شود. در برخورد نور به نیمه‌هادی نوع p الکترون و حفرت تولید می‌شود. الکترون-حفرت تشکیل شده به سمت فصل مشترک دو نیمه‌هادی حرکت کرده و در فصل مشترک آن دو جدایش بار اتفاق می‌افتد. در صورت بسته شدن مدار خارجی، الکترون‌ها و حفرت، تولید جریان الکتریسیته می‌نمایند.



شکل ۵ شماتیکی از اثر فوتولتائیک^۲

۲-۱- مکانیزم عملکرد سلول‌های خورشیدی

اثر فوتولتائیک از چهار مرحله اساسی شامل جذب نور، تولید الکترون-حفرت، انتقال بار، و جمع آوری آن تشکیل شده است [۱۲]. جذب نور هنگامی رخ می‌دهد که مواد دارای خصلت نیمه‌هادی باشند به گونه‌ای که بتوانند به نور ورودی پاسخ دهند. خصوصیات جذبی به میزان باندگپ مواد و ضریب جذب ذاتی آن‌ها بستگی دارد. مرحله بعدی تولید الکترون-حفرت می‌باشد. هنگامی که نور ورودی به الکترون‌های حالت پایه در ترکیبات نیمه‌هادی معدنی برخورد می‌کند، حاملان بار شامل الکترون‌ها و حفرت‌های آزاد تولید می‌کند. در حالی که در مواد نیمه‌هادی آلی الکترون‌های برانگیخته به آرامی به آسایش رسیده و اکسایتون^۳ (جفت الکترون-حفرت) را تولید می‌کنند. برای ساخت یک سلول فوتولتائیک آلی کارآمد تفکیک مناسب اکسایتون کلید اصلی است زیرا انرژی پیوندی اکسایتون بسیار بزرگ است. مرحله بعدی پس از تفکیک اکسایتون، انتقال الکترون-حفرت می‌باشد. این مرحله شامل

4. Charge Trap
5. Single Junction
6. www.solarserver.com
7. Thin Film

1. Edmund Becquerel
2. <http://www.F-alpha.net/>
3. Exciton

نیمه‌هادی مانند TiO_2 , ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5 [۳۹-۴۲]، الکترودهای شفاف نوری، رنگدانه‌های حساس‌ساز نوری، نمک‌های معدنی، حلال‌ها و الکترودهای فلزی (Pt, Au) 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 معیوبی مانند پایداری کم، کپسوله شدن^۸ و نشت حلال را دارند. نشت حلال منجر به کاهش غلظت الکترولیت و در نتیجه کاهش عملکرد دستگاه می‌گردد [۳۹، ۴۵-۴۳].

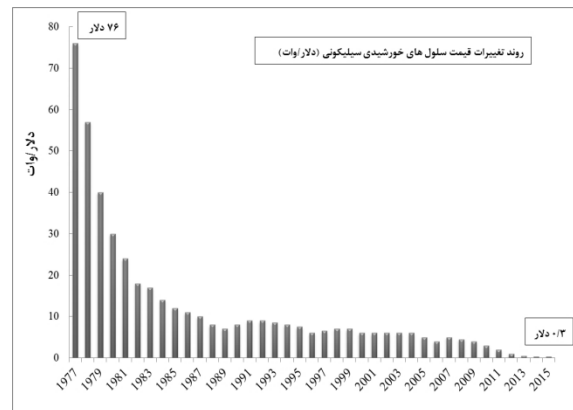
برای جایگزین نمودن الکترولیت مایع فرار در سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه نسل جدیدی از سلول‌ها با عنوان سلول‌های خورشیدی شبه جامد حساس شده به رنگدانه توسعه یافتند که در ساختار آنها از انتقال دهنده‌های حفره در حالت جامد یا شبه جامد استفاده می‌گردد و شامل ترکیبات نیمه‌هادی نوع p یا مواد آلی انتقال دهنده حفره، الکترولیت مایع یونی یا الکترولیت پلیمری می‌باشند. این مواد بایستی در محدوده مرئی تابش شفاف بوده، رنگدانه حساس کننده نوری را در خود حل نموده و همچنین قابلیت لایه نشانی در شبکه ی نانومتخلخل TiO_2 حساس شده به رنگدانه را داشته باشند. این دستاورد برای حل مشکلاتی مانند نشت حلال، کپسوله شدن و خوردگی سلول‌های حساس شده به رنگدانه مناسب است. سلول‌های حالت جامد کارایی کمتری (حدوداً ۵٪) در مقایسه با سلول‌های حساس شده به رنگدانه مایع (حدوداً ۱۲٪) از خود نشان می‌دهند [۴۸-۴۶]. این گروه از سلول‌های خورشیدی نیز معایبی دارند که برخی از آنها عبارتند از: ناپایداری بودن ژل بکارگرفته شده که منجر به رسانش پایین و نشت حلال در این ساختارها می‌گردد. همچنین دماهای بالا منجر به تخریب و دگرگونی ساختار کپسوله شده می‌گردد. در این راستا تحقیقات کمی بر روی سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه هیبریدی که متشکل از ترکیبات آلی-معدنی است انجام گرفته است [۵۲-۴۹]. شکل ۸ عملکرد یک سلول خورشیدی حساس شده به رنگدانه را نمایش می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است در این دستگاه‌ها یک الکتروود شفاف برای عبور نور وجود دارد که بر روی آن TiO_2 لایه نشانی می‌گردد. سپس رنگدانه‌ها بر روی TiO_2 قرار می‌گیرند. رنگدانه‌ها و TiO_2 در معرض الکترولیت قرار دارند و در الکتروود مقابل نیز فلزی مانند پلاتین قرار می‌گیرد. باتوجه به مکانیزم نمایش داده شده در شکل ۸ نور از الکتروود شفاف عبور کرده و توسط رنگدانه‌ها جذب می‌گردد. جذب نور در رنگدانه منجر به تولید الکترون-حفره در این ساختارها می‌گردد. بدان معنا که الکترون از تراز پایه ی رنگدانه به تراز برانگیخته منتقل می‌شود. الکترون انتقال یافته به تراز ی با سطح انرژی بالاتر یعنی به تراز رسانش TiO_2 و از آنجا به فوتوآند انتقال می‌یابد. به واسطه بسته شدن مدار خارجی این الکترون‌ها در سل الکتروشیمیایی طراحی شده بعنوان سلول خورشیدی به گردش در می‌آیند. حفره ایجاد شده در تراز HOMO (بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده) رنگدانه توسط تبادلات یونی الکترولیت و تولید الکترون آزاد طی این تبدیل‌ها جبران می‌گردد و چرخه ی تولید جریان الکتریسیته به همین روش ادامه می‌یابد.

نسل سوم از سلول‌های خورشیدی با هدف بازدهی بالاتر و قیمت پایین‌تر در مقایسه با نسل اول و دوم از این دستگاه‌ها طراحی شدند. سلول‌های خورشیدی دوتایی^۱، سلول‌های خورشیدی نانو ساختار و سلول‌های خورشیدی چنداتصال^۲ نمونه‌ای از این دستگاه‌ها می‌باشند. همچنین انواع دیگر سلول‌های خورشیدی شامل سلول‌های خورشیدی مایع حساس شده به رنگدانه^۳، سلول‌های خورشیدی حالت جامد حساس شده به رنگدانه^۴، سلول‌های حساس شده به نقاط کوانتومی^۵ و سلول‌های خورشیدی آلی^۶ نیز طراحی و ساخته شده‌اند [۳۵-۱۶].

سلول‌های خورشیدی بر پایه ی سیلیکون به دلیل طول عمر بالاتر و بازده بیشتر همچنان بخش عمده بازار فوتوولتائیک جهان را در دست دارند.

۲-۳- هزینه ی انرژی خورشیدی

هزینه ی انرژی خورشیدی با واحد اولیه یعنی وات پیک داده می‌شود. هزینه ی یک ماژول خورشیدی به اندازه ی پنل ساخته شده بستگی دارد. ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه ی بالای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به فرآیند نصب و راه اندازی و ۴۰٪ هزینه‌ها به مواد و فرآیند ساخت آنها نسبت داده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که هزینه ی سلول‌های خورشیدی در سال ۲۰۱۰ برابر ۴ دلار بر وات (۳ یورو بر وات) برای ۴۴۰ ماژول محاسبه شده است [۳۶]. قیمت تمام شده با کاهش یا افزایش رشد بازار تغییر می‌کند. شکل ۷ تغییر قیمت‌ها در دهه ی اخیر را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است قیمت‌ها در امریکا از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ بطور چشمگیری کاهش یافته است.



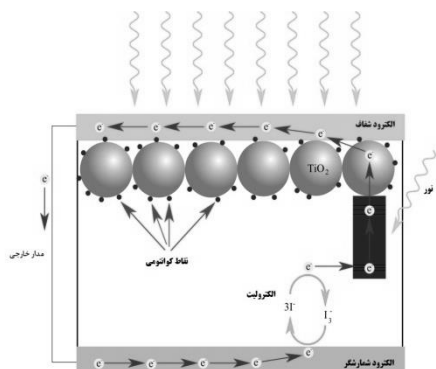
شکل ۷ تغییرات قیمتی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی [۳۶]

۲-۴- سلول‌های خورشیدی غیر سیلیکونی

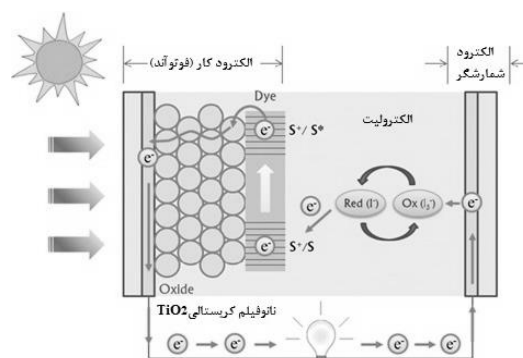
سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه (DSSCs) ارزان قیمت و با کارایی بالا توسط گراتزل و همکارانش با استفاده از تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) کلئیدی برای تقلید از فرآیند طبیعی فوتوسنتز ارائه شدند که در واقع راهکاری نوین جهت جایگزینی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بودند [۳۷]. حساس سازی نوری TiO_2 کلئیدی با استفاده از رنگدانه‌هایی که از مشتقات کلروفیل و پورفیرین‌های طبیعی بودند بازده کوانتومی بالایی مشابه آنچه که در فرآیند فوتوسنتز رخ می‌دهد را نشان داد [۳۸]. سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه از یک فوتوآند متشکل از نانوذره

8. Encapsulation
9. Quasi solid-state Dye-Sensitized Solar Cells
10. Ionic Liquid Electrolyte
11. Highest Occupied Molecular Orbitals

1. Tandem solar cells
2. Multi-junction
3. Liquid Dye-Sensitized Solar Cells
4. Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells
5. Quantum Dot Solar Cells
6. Organic Solar Cells
7. Solar Module



شکل ۹ طرح شماتیکی از یک سلول خورشیدی حساس شده به نقاط کوانتومی^۵



شکل ۸ طرح شماتیکی از عملکرد سلول حساس شده به رنگدانه [۵۳]

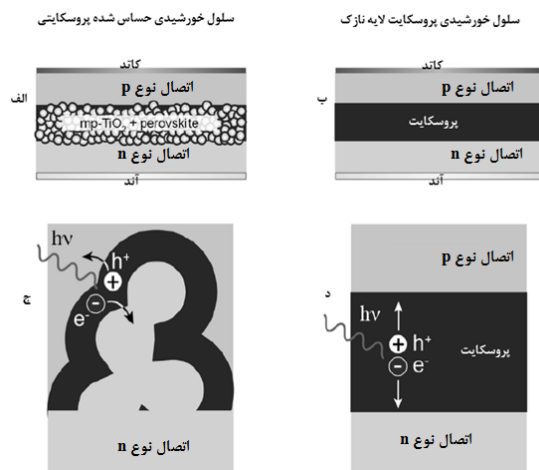
سلول‌های خورشیدی آلی پلیمری نسل دیگری از انواع سلول‌های خورشیدی غیرسیلیکونی هستند که امروزه توسعه فراوانی یافته اند. لایه فعال سلول خورشیدی آلی از دو ترکیب آلی الکترون دهنده و الکترون پذیرنده تشکیل می‌شود که بین یک اتصال نیمه رسانا مانند ایندیوم قلع اکسید (ITO) با تابع کار بالا و یک اتصال فلزی با تابع کار پایین مانند Ca ، Al و Mg ساندویچ شده است. سلول‌های خورشیدی آلی به لحاظ علمی بسیار جذاب هستند زیرا به راحتی و با هزینه ای پایین ساخته می‌شوند. از ویژگی بارز این دستگاه‌ها سبکی و انعطاف پذیری است که آنها را برای کاربردهای مختلف قابل استفاده می‌نماید. در نهایت می‌توان گفت که عملکرد آنها با طراحی‌های مولکولی، سنتز پلیمرهای جدید یا ترکیبات نیمه‌هادی آلی، قابل تغییر و افزایش می‌باشد. بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری در مقایسه با سلول‌های سیلیکونی و سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه پایین تر است که به دلیل عدم تطابق طیفی بین ترکیبات جذب نور در این سلول‌ها و طیف تابشی خورشید می‌باشد. همچنین تحرک پایین حاملان بار و جمع آوری ناکارآمد الکترون و حفره توسط الکترودها به عنوان مهمترین چالش در این مسیر مطرح می‌گردد. تاکنون انواع مختلفی از این سلول‌ها شامل سلول‌های خورشیدی آلی تک لایه^۶، اتصال ناهمگن دولایه^۷ و اتصال ناهمگن توده ای^۸ طراحی و ساخته شده اند [۶۱-۵۸]. شکل ۱۰ دو معماری مهم از ساختار سلول‌های خورشیدی پلیمری را نمایش می‌دهد. بخش الف، ساختار اتصال ناهمگن دولایه را نمایش می‌دهد که در آن یک لایه ی پلیمری انتقال دهنده الکترون در تماس با یک لایه پلیمری پذیرنده الکترون می‌باشد. بخش ب نیز یک معماری اتصال ناهمگن توده‌ای (بالک هتروجانکشن) را نمایش می‌دهد. در این معماری هردو ترکیب پلیمری دهنده و پذیرنده الکترون با یکدیگر مخلوط می‌گردند. در بخش ج عملکرد سلول خورشیدی پلیمری به اختصار نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، مکانیزم عملکرد سلول خورشیدی پلیمری شامل ۴ مرحله می‌باشد. ابتدا نور خورشید توسط لایه ی فعال (ترکیب پذیرنده الکترون) جذب می‌شود. بعد از جذب نور اکسایتون (جفت الکترون-حفره) تشکیل می‌شود. اکسایتون در لایه پلیمری دهنده الکترون نفوذ می‌کند تا به فصل مشترک دو ترکیب دهنده و پذیرنده الکترون برسد. در فصل مشترک با توجه به الکترون خواهی و پتانسیل یونی‌زاسیون بالاتر ترکیب پذیرنده، الکترون برانگیخته شده بواسطه جذب نور

گروه دوم سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی (CQDSCs) می‌باشند که بر پایه سلول‌های خورشیدی گراتزل یا حساس به رنگدانه طراحی شده‌اند اما از ترکیبات نیمه‌هادی با باندگپ پایین استفاده می‌کنند که بتوان از آنها برای تهیه نقاط کوانتومی مانند CdS ، $CdSe$ ، Sb_2S_3 ، PbS استفاده نمود. در این دستگاه‌ها بجای کاربرد رنگدانه‌های آلی یا آلی فلزی جذب نور از نقاط کوانتومی استفاده می‌شود. تغییرات در اندازه نقاط کوانتومی منجر به تغییرات شدت طول موج نور جذب شده در این سلول‌ها می‌گردد [۵۴]. در سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی نیز مانند سلول‌های حساس شده به رنگدانه لایه مزوپور TiO_2 اسکلت اصلی سلول را تشکیل می‌دهد و لایه نشانی ذرات کوانتومی بر روی لایه TiO_2 منجر به حساسیت نوری در این ساختارها می‌گردد. پوشش دهی ذرات کوانتومی بر روی لایه ی TiO_2 با استفاده از روش‌های مختلفی مانند رسوب دهی حمام شیمیایی^۹، لایه نشانی الکتروفورتیک^{۱۰} یا جذب و واکنش لایه یونی متوالی^{۱۱} امکان پذیر است. مدار الکتریکی در نهایت با استفاده از زوج کاهنده/اکسنده (ردوکس) جامد و یا مایع بسته می‌شود. بازدهی سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی در سلول‌های اتصال مایع و سلول‌های حالت جامد به بیشتر از ۵٪ رسیده است [۵۷-۵۵]. شکل ۹ طرح شماتیکی از ساختار یک QDSSC را نمایش می‌دهد. سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی به لحاظ مکانیزم عملکرد مشابه با سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه عمل می‌کنند. تفاوت میان این دو گروه از سلول‌های خورشیدی اختلاف در نوع جذب کننده نور می‌باشد. در سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقاط کوانتومی این بخش‌ها نقاط کوانتومی هستند که وظیفه جذب نور و تولید الکترون-حفره و انتقال الکترون به تراز رسانش TiO_2 را به عهده دارند. ادامه مکانیزم عملکرد، مشابه با سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه می‌باشد.

5. Valerie Collins, Fadzai Fungura, Zach Zasada, Quantum Dot Sensitized Solar Cells, Cornell University
6. Single Layer
7. Bilayer Heterojunction
8. Bulk Heterojunction

1. Colloidal Quantum Dot Solar Cells (CQDSCs)
2. Chemical Bath Deposition (CBD)
3. Electrophoretic Deposition
4. Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR)

برای هر دو جزء الکترون و حفره طول نفوذی معادل با یک میکرون را دارا می‌باشند که این مقدار طول نفوذ عدد بسیار قابل توجهی می‌باشد [۶۹]. عدد طول نفوذ بالا به آن معناست که این مواد می‌توانند به طور مؤثری در یک معماری لایه نازک بکار برده شوند. همچنین حاملین بار می‌توانند در ترکیبات پروسکایت فواصل طولانی را طی کنند. شکل ۱۲ نمونه‌ای از دو ساختار پروسکایتی را نشان می‌دهد. در بخش الف ساختار سلول خورشیدی حساس شده به پروسکایت و بخش ج مکانیزم عملکرد این دستگاه را نشان می‌دهد. در این ساختار پروسکایت که به عنوان جاذب نور و تولید کننده الکترون و حفره عمل می‌کند بر روی نانوذرات متخلخل TiO_2 قرار گرفته و مجموعه ی آن‌ها بر روی آند قرار می‌گیرند. بعد از جذب نور توسط پروسکایت الکترون از تراز پایه به تراز برانگیخته (رسانش) انتقال می‌یابد. سپس الکترون از تراز رسانش پروسکایت به تراز رسانش TiO_2 و از آنجا به الکتروود آند منتقل شده و در مدار خارجی تولید جریان می‌کند. در بخش‌های ب و د به ترتیب ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی لایه نازک و مکانیزم عملکرد آن نمایش داده شده است. در این ساختار، ماده پروسکایت بین دو نیمه هادی نوع n و p ساندویچ شده است. بعد از جذب نور در لایه پروسکایت الکترون‌ها به سمت نیمه‌هادی نوع n و حفرات به سمت نیمه‌هادی نوع p حرکت می‌کنند.

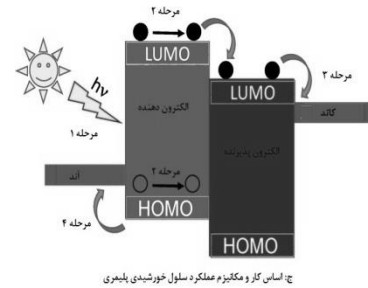
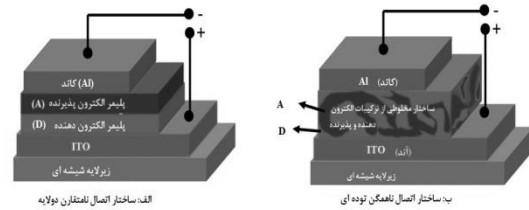


شکل ۱۲ الف: سلول خورشیدی حساس شده به پروسکایت، ب: سلول خورشیدی پروسکایتی لایه نازک، ج: مکانیزم عملکرد سلول خورشیدی شکل الف، د: مکانیزم عملکرد سلول خورشیدی شکل ب (منبع: ویکیپدیا)

۲- مزایا و معایب سلول‌های خورشیدی

در جدول ۱ مزایا و معایب سلول‌های خورشیدی در دو گروه کلی آلی و معدنی به اختصار نمایش داده شده است. همانطور که در جدول مشخص است، مهمترین عیب سلول‌های خورشیدی آلی پایداری کم آن‌ها در شرایط محیطی مختلف و همچنین بازده پایین این سلول‌ها می‌باشد. دلیل این بازده پایین جذب محدود طول موج‌های خورشید و همچنین گاف انرژی بالا در بسیاری از انواع مواد آلی می‌باشد. در سلول‌های خورشیدی معدنی مهمترین عیب هزینه ی بالا و فرآیند دشوار تولید این گروه از سلول‌های خورشیدی می‌باشد. لازم به ذکر است که هر دو گروه از سلول‌های خورشیدی از مزایای بسیاری برخوردار هستند. معایب موجود در هر دو گروه از سلول‌های خورشیدی راه را برای تحقیقات بیشتر دانشمندان در برطرف کردن این معایب باز نگه می‌دارد.

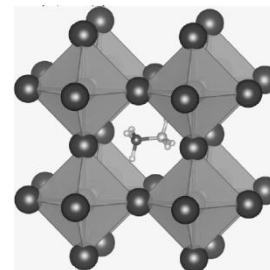
به ترکیب پذیرنده انتقال می‌یابد. سرانجام الکترون‌ها به سمت کاتد و حفرات به سمت آند حرکت کرده و در الکترودهای مربوطه بار ذخیره می‌شود.



شکل ۱۰ ساختارهای مختلف سلول خورشیدی پلیمری و مکانیزم عملکرد آن [۶۲]

۵-۲- سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

جدیدترین نسل از سلول‌های خورشیدی که حدوداً از سال ۲۰۱۴ مورد توجه جوامع علمی در سراسر دنیا قرار گرفته اند سلول‌های خورشیدی پروسکایتی می‌باشند. این گروه از سلول‌های خورشیدی از ترکیبات پروسکایت که عموماً یک هیبرید آلی-معدنی سرب و یا موادی برپایه هالیدهای قلع هستند تشکیل شده‌اند. مواد پروسکایت دارای دو مزیت بسیار مهم هستند: ارزانی در تولید و آسانی در ساخت. نکته ی حائز اهمیت در ارتباط با این گروه از سلول‌های خورشیدی بازده بسیار بالای آنها در آغاز کشف می‌باشد به گونه ای که از بازده ۳/۸٪ در سال ۲۰۰۹ به بازده ۲۰/۱٪ در سال ۲۰۱۵ رسیدند که تا امروز بعنوان سریعترین تکنولوژی درحال پیشرفت در زمینه ی سلول‌های خورشیدی شناخته می‌شود. قیمت پایین در ساخت و بازده بالا در این گروه از سلول‌های خورشیدی منجر به ایجاد یک بازار بزرگ تا سال ۲۰۱۷ برای این سلول‌های خورشیدی می‌گردد [۶۵-۶۳]. شکل ۱۱ ساختار کریستالی یک ترکیب پروسکایتی به فرمول $CH_3NH_3PbX_3$ را نمایش می‌دهد که X در آن یکی از هالوژن‌های I و Br و یا Cl می‌باشد. همچنین کاتیون متیل آمونیوم ($CH_3NH_3^+$) توسط ساختار اکتاهدرال از PbX_6 احاطه شده است [۶۶].



شکل ۱۱ ساختار کریستالی پروسکایت [۶۶]

یکی از مهمترین ویژگی‌های سیستم‌های پروسکایتی هالیدهای متیل آمونیوم سرب آن است که می‌توان باندگپ آن‌ها (بین ۱/۵ تا ۲/۳ الکترون ولت) را با مقدار هالید بکار برده شده تغییر داد [۶۷، ۶۸]. همچنین این مواد

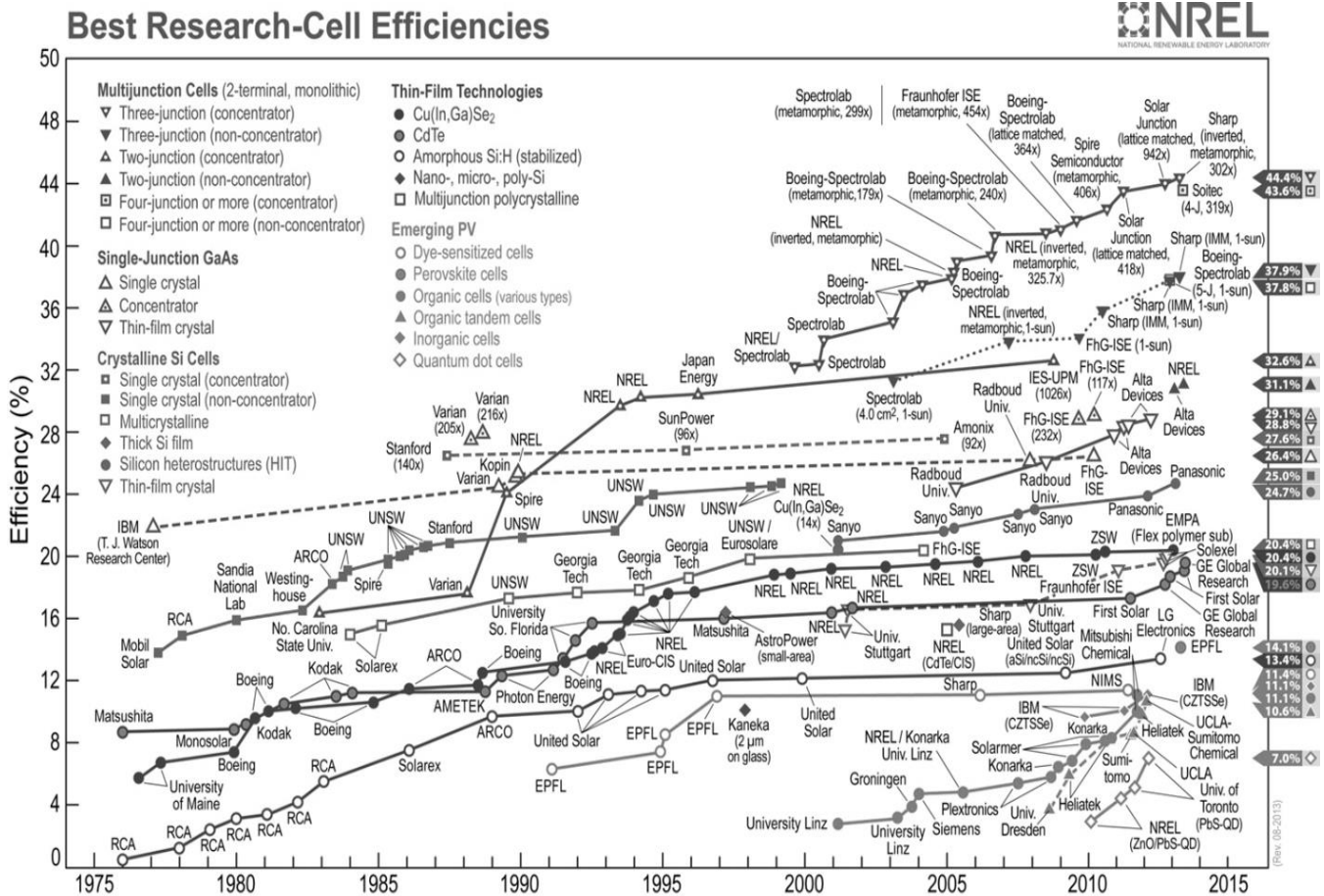
سلول‌های خورشیدی سیلیکونی شامل سیلیکون‌های بی شکل مورد مطالعه قرار گرفتند. طی سال‌های بعدی نسل‌های مختلفی از سلول‌های سیلیکونی و سپس سلول‌های خورشیدی لایه نازک در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی تراز اول دنیا مانند RCA، مانتوسیتا، دانشگاه مین، دانشگاه IBM طراحی و ساخته شدند. در مجموع تا سال ۱۹۹۱ بخش عمده فعالیت‌های تحقیقاتی انجام شده در زمینه سلول‌های خورشیدی سیلیکونی در انواع مختلف، سلول‌های خورشیدی لایه نازک و سلول‌های خورشیدی چنداتصال بود. از سال ۱۹۹۱ به بعد نسل جدیدی از سلول‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند که به ترتیب حضورشان در مجامع تحقیقاتی و دانشگاهی شامل سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگدانه (سال ۱۹۹۱ در دانشگاه EPFL)، سلول‌های خورشیدی آلی (سال ۲۰۰۱ در دانشگاه لینز)، سلول‌های خورشیدی حساس شده به نقاط کوانتومی (سال ۲۰۱۰ در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده آمریکا) و در نهایت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (سال ۲۰۱۴ در دانشگاه EPFL) می‌باشند. با توجه به مزایا و معایب ذکر شده برای نسل‌های مختلف از سلول‌های خورشیدی می‌توان با توجه به کاربرد، امکانات طبیعی و غیرطبیعی، نیازمندی‌ها، مواد اولیه و مواد در دسترس، تکنولوژی و صنعت مربوطه، بومی بودن یا وارداتی بودن تکنولوژی ساخت و در نهایت عرضه و تقاضا، به طور آکادمیک و یا صنعتی بر روی طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی تحقیقات وسیعی انجام داد.

جدول ۱ انواع سلول‌های خورشیدی به همراه مزایا و معایب آنها

نوع	مزایا	معایب
سلول‌های خورشیدی آلی	هزینه پایین، قابلیت انعطاف پذیری، سازگاری با محیط زیست، روش ساخت سریع و آسان، امکان فرآیند پذیری در حالت محلول، تولید صنعتی با اشغال فضای کم، امکان سنتز مواد آلی	پایداری کوتاه مدت بازده پایین (گاف انرژی نسبتاً بزرگ)
	بازده بالا، پایداری محیطی بسیار خوب، قابلیت انعطاف پذیری در سیستم‌های لایه نازک	فرآیند ساخت مشکل و پرهزینه فرآیندهای حرارتی دمای بالا در حین تولید
	سلول‌های معدنی	

نتیجه گیری

پیشرفت سلول‌های خورشیدی در این مقاله مروری به طور خلاصه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. در این شکل تکنولوژی‌های مختلف سلول‌های خورشیدی نشان داده شده است. می‌توان از شکل ۱۳ پیشرفت صنایع مختلف برای دستیابی به بازدهی بالاتر را استنباط نمود. در واقع این نمودار بازده سلول‌های خورشیدی مختلف را به عنوان تابعی از سال پیشرفت و تکامل انواع نسل‌های سلول خورشیدی در دانشگاه‌های تراز اول دنیا نمایش می‌دهد. همانگونه که در تصویر مشخص است در سال ۱۹۷۶ اولین نسل از



شکل ۱۳ بازده سلول‌های خورشیدی به عنوان تابعی از زمان با استفاده از تکنولوژی‌های مختلف فتوولتائی در طول فرآیند پیشرفت (منبع: آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده)

- [24] P. V. Kamat, "Quantum dot solar cells. Semiconductor nanocrystals as light harvesters†," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 112, pp. 18737-18753, 2008.
- [25] M. Liang, W. Xu, F. Cai, P. Chen, B. Peng, J. Chen, and Z. Li, "New triphenylamine-based organic dyes for efficient dye-sensitized solar cells," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 111, pp. 4465-4472, 2007.
- [26] H. J. Snaith and L. Schmidt-Mende, "Advances in Liquid-Electrolyte and Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells," *Advanced Materials*, vol. 19, pp. 3187-3200, 2007.
- [27] W. M. Campbell, A. K. Burrell, D. L. Officer, and K. W. Jolley, "Porphyrins as light harvesters in the dye-sensitized TiO₂ solar cell," *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 248, pp. 1363-1379, 2004.
- [28] L. Peter, "Characterization and modeling of dye-sensitized solar cells," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 111, pp. 6601-6612, 2007.
- [29] G. Hodes, "Comparison of dye-and semiconductor-sensitized porous nanocrystalline liquid junction solar cells," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 112, pp. 17778-17787, 2008.
- [30] F. Gao, Y. Wang, D. Shi, J. Zhang, M. Wang, X. Jing, R. Humphry-Baker, P. Wang, S. M. Zakeeruddin, and M. Grätzel, "Enhance the optical absorptivity of nanocrystalline TiO₂ film with high molar extinction coefficient ruthenium sensitizers for high performance dye-sensitized solar cells," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 130, pp. 10720-10728, 2008.
- [31] M. Biancardo, K. West, and F. C. Krebs, "Quasi-solid-state dye-sensitized solar cells: Pt and PEDOT: PSS counter electrodes applied to gel electrolyte assemblies," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 187, pp. 395-401, 2007.
- [32] H. J. Snaith, G. L. Whiting, B. Sun, N. C. Greenham, W. T. Huck, and R. H. Friend, "Self-organization of nanocrystals in polymer brushes. Application in heterojunction photovoltaic diodes," *Nano letters*, vol. 5, pp. 1653-1657, 2005.
- [33] W. H. Howie, F. Claeysens, H. Miura, and L. M. Peter, "Characterization of solid-state dye-sensitized solar cells utilizing high absorption coefficient metal-free organic dyes," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 130, pp. 1367-1375, 2008.
- [34] G. M. Lowman and P. T. Hammond, "Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells Combining a Porous TiO₂ Film and a Layer-by-Layer Composite Electrolyte," *Small*, vol. 1, pp. 1070-1073, 2005.
- [35] D. Eder and A. H. Windle, "Carbon-Inorganic Hybrid Materials: The Carbon-Nanotube/TiO₂ Interface," *Advanced Materials*, vol. 20, pp. 1787-1793, 2008.
- [36] W. Schnabel, *Polymers and light*: Wiley. com, 2007.
- [37] B. O'regan and M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films," *nature*, vol. 353, pp. 737-740, 1991.
- [38] A. Kay and M. Graetzel, "Artificial photosynthesis. 1. Photosensitization of titania solar cells with chlorophyll derivatives and related natural porphyrins," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 97, pp. 6272-6277, 1993.
- [39] B. G. O'Regan, M., *Nature* vol. 353, p. 737-740 1991.
- [40] Y. T. AE Suliman, L. Xu, *Solar Energy Mater. Solar Cell*, vol. 91 pp. 1658-1662, 2007.
- [41] A. Furube, M. Murai, S. Watanabe, K. Hara, R. Katoh, and M. Tachiya, "Near-IR transient absorption study on ultrafast electron-injection dynamics from a Ru-complex dye into nanocrystalline In₂O₃ thin films: Comparison with SnO₂, ZnO, and TiO₂ films," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 182, pp. 273-279, 2006.
- [42] K. Sayama, H. Sugihara, and H. Arakawa, "Photoelectrochemical properties of a porous Nb₂O₅ electrode sensitized by a ruthenium dye," *Chemistry of Materials*, vol. 10, pp. 3825-3832, 1998.
- [43] Q. Wang, S. Ito, M. Grätzel, F. Fabregat-Santiago, I. Mora-Sero, J. Bisquert, T. Bessho, and H. Imai, "Characteristics of high efficiency dye-sensitized solar cells," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, pp. 25210-25221, 2006.
- [44] K. Kalyanasundaram and M. Grätzel, "Applications of functionalized transition metal complexes in photonic and optoelectronic devices," *Coordination chemistry reviews*, vol. 177, pp. 347-414, 1998.
- [1] P. V. Kamat, "Meeting the clean energy demand: nanostructure architectures for solar energy conversion," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 111, pp. 2834-2860, 2007.
- [2] C. Li, M. Liu, N. G. Pschirer, M. Baumgarten, and K. Müllen, "Polyphenylene-based materials for organic photovoltaics," *Chemical Reviews*, vol. 110, pp. 6817-6855, 2010.
- [3] B. Li, L. Wang, B. Kang, P. Wang, and Y. Qiu, "Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 549-573, 3/23/ 2006.
- [4] S. M. Hanasoge, T. L. Duvall, and K. R. Sreenivasan, "Anomalously weak solar convection," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, pp. 11928-11932, 2012.
- [5] B. CE, *Solar Cells*. New York, 1976.
- [6] P. JE, *Choice of an equivalent black body solar temperature* vol. 51, 1993.
- [7] C. Sachse, L. Müller-Meskamp, L. Bormann, Y. H. Kim, F. Lehnert, A. Philipp, B. Beyer, and K. Leo, "Transparent, dip-coated silver nanowire electrodes for small molecule organic solar cells," *Organic Electronics*, vol. 14, pp. 143-148, 2013.
- [8] K.-H. Choi, J. Kim, Y.-J. Noh, S.-I. Na, and H.-K. Kim, "Ag nanowire-embedded ITO films as a near-infrared transparent and flexible anode for flexible organic solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 110, pp. 147-153, 2013.
- [9] C.-C. Chen, L. Dou, R. Zhu, C.-H. Chung, T.-B. Song, Y. B. Zheng, S. Hawks, G. Li, P. S. Weiss, and Y. Yang, "Visibly transparent polymer solar cells produced by solution processing," *Acs Nano*, vol. 6, pp. 7185-7190, 2012.
- [10] C.-C. Chen, L. Dou, J. Gao, W.-H. Chang, G. Li, and Y. Yang, "High-performance semi-transparent polymer solar cells possessing tandem structures," *Energy & Environmental Science*, vol. 6, pp. 2714-2720, 2013.
- [11] P. Gevorkian, *Sustainable Energy System Engineering: The Complete Green Building Design Resource*: McGraw Hill Professional, 2007.
- [12] S. R. Forrest, "The limits to organic photovoltaic cell efficiency," *MRS bulletin*, vol. 30, pp. 28-32, 2005.
- [13] M. Knupfer, "Exciton binding energies in organic semiconductors," *Applied Physics A*, vol. 77, pp. 623-626, 2003.
- [14] E. Ernst and H. VonFoerster, "Electron bunches of short time duration," *Journal of Applied Physics*, vol. 25, pp. 674-675, 1954.
- [15] T. Saga, *NPG Asia Mater*, vol. 2, pp. 96-102, 2010.
- [16] P. Sirimanne and V. Perera, "Progress in dye-sensitized solid state solar cells," *physica status solidi (b)*, vol. 245, pp. 1828-1833, 2008.
- [17] A. Petrozza, C. Groves, and H. J. Snaith, "Electron Transport and Recombination in Dye-Sensitized Mesoporous TiO₂ Probed by Photoinduced Charge-Conductivity Modulation Spectroscopy with Monte Carlo Modeling," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 130, pp. 12912-12920, 2008/10/01 2008.
- [18] M. Grätzel, "Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells," *Inorganic Chemistry*, vol. 44, pp. 6841-6851, 2005/10/01 2005.
- [19] J. E. Kroeze, N. Hirata, L. Schmidt-Mende, C. Orizu, S. D. Ogier, K. Carr, M. Grätzel, and J. R. Durrant, "Parameters Influencing Charge Separation in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells Using Novel Hole Conductors," *Advanced Functional Materials*, vol. 16, pp. 1832-1838, 2006.
- [20] H. J. Snaith, A. J. Moule, C. Klein, K. Meerholz, R. H. Friend, and M. Grätzel, "Efficiency enhancements in solid-state hybrid solar cells via reduced charge recombination and increased light capture," *Nano Letters*, vol. 7, pp. 3372-3376, 2007.
- [21] H. J. Snaith, R. Humphry-Baker, P. Chen, I. Cesar, S. M. Zakeeruddin, and M. Grätzel, "Charge collection and pore filling in solid-state dye-sensitized solar cells," *Nanotechnology*, vol. 19, p. 424003, 2008.
- [22] H. J. Snaith and M. Grätzel, "Light-enhanced charge mobility in a molecular hole transporter," *Physical review letters*, vol. 98, p. 177402, 2007.
- [23] J. Bisquert, D. Cahen, G. Hodes, S. Rühle, and A. Zaban, "Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, pp. 8106-8118, 2004.

- [64] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, pp. 6050-6051, 2009.
- [65] E. Wei, X. Ren, L. Chen, and W. C. Choy, "The efficiency limit of CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 106, p. 221104, 2015.
- [66] C. Eames, J. M. Frost, P. R. Barnes, B. C. O'regan, A. Walsh, and M. S. Islam, "Ionic transport in hybrid lead iodide perovskite solar cells," *Nature communications*, vol. 6, 2015.
- [67] G. E. Eperon, S. D. Stranks, C. Menelaou, M. B. Johnston, L. M. Herz, and H. J. Snaith, "Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells," *Energy & Environmental Science*, vol. 7, pp. 982-988, 2014.
- [68] J. H. Noh, S. H. Im, J. H. Heo, T. N. Mandal, and S. I. Seok, "Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic-organic hybrid nanostructured solar cells," *Nano letters*, vol. 13, pp. 1764-1769, 2013.
- [69] S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, and H. J. Snaith, "Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber," *Science*, vol. 342, pp. 341-344, 2013.
- [45] E. Palomares, J. N. Clifford, S. A. Haque, T. Lutz, and J. R. Durrant, "Control of charge recombination dynamics in dye sensitized solar cells by the use of conformally deposited metal oxide blocking layers," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 125, pp. 475-482, 2003.
- [46] K. Tennakone, V. Perera, I. Kottogoda, and G. Kumara, "Dye-sensitized solid state photovoltaic cell based on composite zinc oxide/tin (IV) oxide films," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, p. 374, 1999.
- [47] T. Taguchi, X.-t. Zhang, I. Sutanto, K.-i. Tokuhito, T. N. Rao, H. Watanabe, T. Nakamori, M. Uragami, and A. Fujishima, "Improving the performance of solid-state dye-sensitized solar cell using MgO-coated TiO₂ nanoporous film," *Chemical Communications*, pp. 2480-2481, 2003.
- [48] G. Kumara, M. Okuya, K. Murakami, S. Kaneko, V. Jayaweera, and K. Tennakone, "Dye-sensitized solid-state solar cells made from magnesiumoxide-coated nanocrystalline titanium dioxide films: enhancement of the efficiency," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 164, pp. 183-185, 2004.
- [49] J. Bouclé, P. Ravirajan, and J. Nelson, "Hybrid polymer-metal oxide thin films for photovoltaic applications," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 17, pp. 3141-3153, 2007.
- [50] I. Gur, N. A. Fromer, C.-P. Chen, A. G. Kanaras, and A. P. Alivisatos, "Hybrid solar cells with prescribed nanoscale morphologies based on hyperbranched semiconductor nanocrystals," *Nano Letters*, vol. 7, pp. 409-414, 2007.
- [51] A. Mozer, Y. Wada, K.-J. Jiang, N. Masaki, S. Yanagida, and S. Mori, "Efficient dye-sensitized solar cells based on a 2-thiophen-2-yl-vinyl-conjugated ruthenium photosensitizer and a conjugated polymer hole conductor," *Applied physics letters*, vol. 89, pp. 043509-043509-3, 2006.
- [52] A. Hagfeldt and M. Graetzel, "Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems," *Chemical Reviews*, vol. 95, pp. 49-68, 1995.
- [53] Q. Zhang, D. Myers, J. Lan, S. A. Jenekhe, and G. Cao, "Applications of light scattering in dye-sensitized solar cells," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 14, pp. 14982-14998, 2012.
- [54] O. E. Semonin, J. M. Luther, S. Choi, H.-Y. Chen, J. Gao, A. J. Nozik, and M. C. Beard, "Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell," *Science*, vol. 334, pp. 1530-1533, 2011.
- [55] P. V. Kamat, "Boosting the efficiency of quantum dot sensitized solar cells through modulation of interfacial charge transfer," *Accounts of chemical research*, vol. 45, pp. 1906-1915, 2012.
- [56] P. K. Santra and P. V. Kamat, "Mn-doped quantum dot sensitized solar cells: a strategy to boost efficiency over 5%," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 134, pp. 2508-2511, 2012.
- [57] S.-J. Moon, Y. Itzhaik, J.-H. Yum, S. M. Zakeeruddin, G. Hodes, and M. Grätzel, "Sb₂S₃-based mesoscopic solar cell using an organic hole conductor," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 1, pp. 1524-1527, 2010.
- [58] C. Li, Y. Chen, Y. Wang, Z. Iqbal, M. Chhowalla, and S. Mitra, "A fullerene-single wall carbon nanotube complex for polymer bulk heterojunction photovoltaic cells," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 17, pp. 2406-2411, 2007.
- [59] L. Schmidt-Mende, W. M. Campbell, Q. Wang, K. W. Jolley, D. L. Officer, M. K. Nazeeruddin, and M. Grätzel, "Zn-Porphyrin-Sensitized Nanocrystalline TiO₂ Heterojunction Photovoltaic Cells," *ChemPhysChem*, vol. 6, pp. 1253-1258, 2005.
- [60] J. M. K. M. M. Wienk, W. J. H. Verhees, J. Knol, J. C. and P. A. v. H. Hummelen, R. A. J. Janssen, *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 42, pp. 3371 - 3375, 2003.
- [61] J. Y. Kim, K. Lee, N. E. Coates, D. Moses, T.-Q. Nguyen, M. Dante, and A. J. Heeger, "Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing," *Science*, vol. 317, pp. 222-225, 2007.
- [62] P. Kumaresan, S. Vegiraju, Y. Ezhumalai, S. L. Yau, C. Kim, W.-H. Lee, and M.-C. Chen, "Fused-Thiophene Based Materials for Organic Photovoltaics and Dye-Sensitized Solar Cells," *Polymers*, vol. 6, pp. 2645-2669, 2014.
- [63] S. Collavini, S. F. Völker, and J. L. Delgado, "Understanding the Outstanding Power Conversion Efficiency of Perovskite-Based Solar Cells," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 54, pp. 9757-9759, 2015.