

کاربردهای فناوری نانو در سلول‌های خورشیدی



مؤلفان

امیرمحمود بخشایش^۱، مهدی راجی پور^۲

۱- دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، کارگزار شبکه تبادل فناوری نانو، شبکه انرژی خورشیدی نانو، am.bakshshayesh@ut.ac.ir
 ۲- کارشناس کارگروه صنعت و بازار، مدیر شبکه انرژی خورشیدی نانو، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، rajipour@nano.ir

در چند دهه اخیر فناوری نانو نقش تعیین کننده‌ای در بهبود عملکرد سلول‌های سیلیکونی نسل اول و همچنین معرفی سلول‌های خورشیدی نسل‌های جدید بر پایه لایه‌های نازک و نانو ساختارها داشته است. طیف وسیعی از سلول‌های خورشیدی نانو ساختار تاکنون معرفی شده‌اند و گروه‌های تحقیقاتی بسیاری در سراسر دنیا در حال تحقیق و توسعه آن‌ها هستند که از میان آن‌ها می‌توان به سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، رنگدانه‌ای، نقاط کوانتومی، پلیمری، مس ایندیوم گالیوم سلناید (CIGS)، مس روی قلع گوگرد (SZTS)، کادمیم تلوراید و گالیم آرسناید اشاره کرد. از عمده کاربردهای اصلی فناوری نانو در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی نیز پوشش‌های لایه نازک آنتی‌استاتیک، خود تمیز شونده و آب‌گریز بر پایه پلی‌وینیلیدن فلورید یا ارگانوسیلان‌ها هستند که به بهبود بازدهی از طریق کاهش آلودگی‌های سطحی کمک می‌کنند. با توجه به پیشرفت‌های حاصل شده در این حوزه به نظر می‌رسد که نمی‌توان آینده تولید انرژی الکتریکی ارزان قیمت از خورشید را بدون فناوری نانو تصور کرد.

کلمات کلیدی

سلول خورشیدی، نانو ساختار، لایه نازک، پوشش ضد غبار

که برحسب فناوری ساخت در ۵ گروه چنداتصال، گالیم آرسناید تک‌اتصال، سیلیکون بلوری، فناوری‌های لایه نازک و فناوری‌های نوظهور در حال تحقیق و توسعه هستند (جدول ۱). صنعتی بودن این فناوری‌ها منوط به قابلیت تولید انبوه، عمر بالای ماژول و هزینه تمام شده است. بهترین بازدهی‌های به دست آمده مربوط به فناوری‌های چنداتصال، گالیم آرسناید تک‌اتصال و سیلیکون‌های بلوری هستند که در حال حاضر بخش مهمی از بازار را در اختیار دارند؛ اما به‌طور کلی این فناوری‌ها بسیار گران قیمت و پیچیده هستند. به همین دلیل توجه بسیاری از پژوهشگران و صنعتگران به سمت فناوری‌های ارزان قیمت و ساده‌تر لایه‌های نازک و همچنین فناوری‌های نوظهوری چون ساختارهای پروسکایتی جلب شده است.

۱- انواع فناوری ساخت سلول‌های خورشیدی

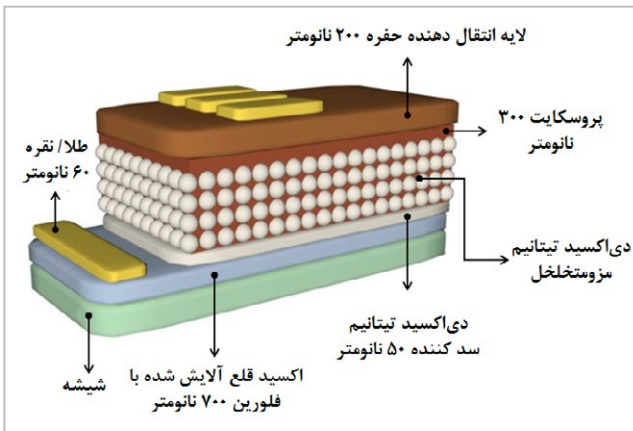
امروزه بهره‌وری از انرژی دائمی، پاک و ارزان قیمت خورشید جهت راه‌اندازی تجهیزات در حوزه‌های صنعتی مختلف به‌طور جدی مورد توجه قرار گرفته است. انرژی نورانی خورشید می‌تواند مستقیماً از طریق اثر فتولتائیک یا به صورت غیرمستقیم توسط متمرکزکننده‌های توان خورشید به انرژی الکتریکی تبدیل شود. فناوری‌های متنوعی در تبدیل انرژی این سیستم‌ها نقش بازی می‌کنند که عمدتاً بر پایه مواد نیمه‌رسانا هستند. آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر (NREL) به‌عنوان بزرگ‌ترین موسسه تحقیقاتی سلول‌های خورشیدی در جهان و مرجع اصلی تأیید بازدهی سلول‌های خورشیدی مونتاژ شده توسط گروه‌های تحقیقاتی، تاکنون ۲۵ نوع سلول خورشیدی را رصد کرده است

جدول ۱- مقایسه فناوری‌های مختلف سلول خورشیدی طبق چارت NREL (تاریخ ۲۰۱۹/۱/۳)

بیشترین بازدهی در تبدیل انرژی نوری به الکتریکی (%)	سلول خورشیدی		فناوری	ردیف
۳۵,۵	Two-junction (concentrator)	دو اتصاله (متمرکز کننده)	چندانصالی	۱
۳۲,۸	Two-junction (non-concentrator)	دو اتصاله (غیرمتمرکز کننده)		
۴۴,۴	Three-junction (concentrator)	سه اتصاله (متمرکز کننده)		
۳۷,۹	Three-junction (non-concentrator)	سه اتصاله (غیرمتمرکز کننده)		
۴۶,۰	Four-junction or more (concentrator)	چهار اتصاله یا بیشتر (متمرکز کننده)		
۳۹,۲	Four-junction or more (non-concentrator)	چهار اتصاله یا بیشتر (غیرمتمرکز کننده)		
۲۷,۸	Single crystal	تک بلور	گالیم آرسناید تک اتصاله	۲
۳۰,۵	Concentrator	متمرکز کننده		
۲۹,۱	Thin-film crystal	بلوری لایه نازک		
۲۷,۶	Single crystal (concentrator)	تک بلور (متمرکز کننده)	سیلیکونی بلوری	۳
۲۶,۱	Single crystal (non-concentrator)	تک بلور (غیرمتمرکز کننده)		
۲۲,۳	Multicrystalline	چند بلوری		
۲۶,۶	Silicon heterostructures (HIS)	ساختارهای ناهمگون		
۲۱,۲	Thin-film crystal	بلوری لایه نازک		
۲۳,۳	Copper indium gallium selenide (concentrator)	CIGS (متمرکز کننده)	لایه‌های نازک	۴
۲۲,۹	Copper indium gallium selenide	CIGS		
۲۲,۱	CdTe	تلورید کادمیم		
۱۴,۰	Amorphous Si:H (stabilized)	آمورف (پایدار شده)		
۱۱,۹	Dye-sensitized solar cells	فعال شده با رنگ		
۲۳,۷	Perovskite solar cells (not stabilized)	پروسکایتی (پایدار نشده)	فناوری‌های نوظهور	۵
۲۸,۰	Perovskite/Si tandem (monolithic)	تاندم پروسکایت/سیلیکون (یکپارچه)		
۱۵,۶	Organic cells (various types)	آلی (انواع مختلف)		

ادامه جدول ۱- مقایسه فناوری‌های مختلف سلول خورشیدی طبق چارت NREL (تاریخ ۲۰۱۹/۱/۳)

ردیف	فناوری	سلول خورشیدی	بیشترین بازدهی در تبدیل انرژی نوری به الکتریکی (%)
۵	فناوری‌های نوظهور	تاندوم آلی	۱۱,۵
		معدنی (CZTSSe)	۱۲,۶
		نقاط کوانتومی (انواع مختلف)	۱۶,۶



شکل ۱- طرحی از لایه‌های نازک سلول خورشیدی پروسکایتی استاندارد

۲- نقش فناوری نانو در سلول‌های خورشیدی

۲-۱-۲ سلول‌های خورشیدی نانو ساختار

در بین سلول‌های خورشیدی نوظهور، سلول‌های پروسکایتی نرخ رشد بازده بیشتری نسبت به بقیه انواع داشته‌اند که با در نظر گرفتن امیدهای زیادی که برای تولید آسان و کم هزینه این سلول‌ها وجود دارد، کاندیدای بسیار مناسبی برای تولید انرژی ارزان قیمت از نور خورشید هستند. لذا تحقیقات وسیعی همچنان بر روی سلول‌های خورشیدی نوظهور در حال انجام است. پروسکایت نام خانواده بزرگی از مواد شیمیایی با ترکیب عمومی ABX_3 است. امروزه توجه بسیاری از محققین به تهیه ساختارهای پیچیده تر پروسکایتی مانند ترکیبات هالید آلی-معدنی جلب شده است که خواص فیزیکی، نوری و الکتریکی قابل توجهی دارند. این ترکیبات دارای ترکیب شیمیایی کلی $APbX_3$ هستند که در آن‌ها X یون تک ظرفیتی مانند فلورین، کلر، برم و ید است. مرسوم ترین این ترکیبات به لحاظ تمرکز گروه‌های تحقیقاتی پیشرو، ساختار پروسکایتی هالیدی متیل آمونیوم سرب^{۲+} با ترکیب شیمیایی $CH_3NH_3PbX_3$ است که به عنوان لایه جذب نور با ضخامت ۴۰۰ نانومتر در این دسته از سلول‌های خورشیدی به کار گرفته می‌شود. سایر اجزای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی استاندارد مطابق شکل ۱ به شرح زیر هستند:

۱- شیشه پوشش داده شده با لایه‌ای از اکسید قلع آرایش شده با فلورین^۲ (FTO) با ضخامت ۷۰۰ نانومتر.

۲- لایه سد کننده^۴ از دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) با فاز کریستالی آناز با ضخامت ۵۰ نانومتر که هدف اصلی از لایه نشانی آن ایجاد فاصله بین شیشه رسانا و لایه جذب است.

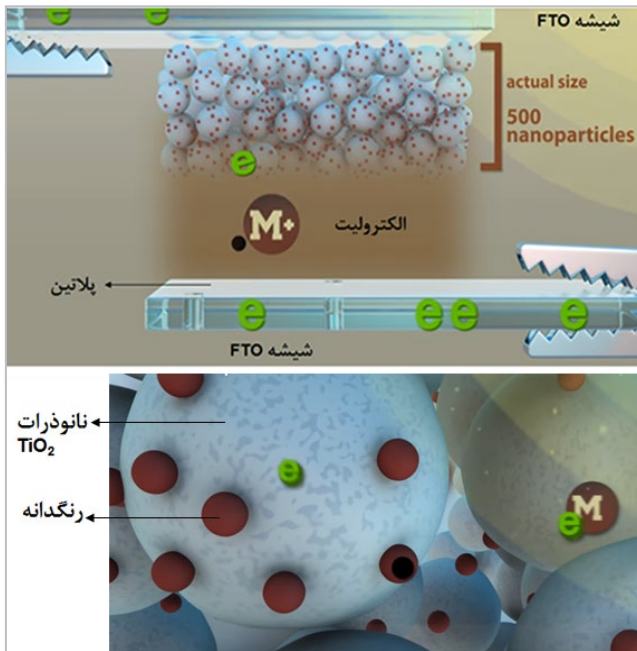
۳- لایه مزومتخلخل از ذرات ۲۰ نانومتری دی اکسید تیتانیوم به عنوان ماده انتقال دهنده الکترون که علاوه بر ایجاد سطح بالا برای افزایش انتقال الکترون از پروسکایت، همانند یک داربست برای پروسکایت عمل می‌کند. ZrO_2 و Al_2O_3 ، ZnO نیز می‌توانند به عنوان لایه مزومتخلخل استفاده شوند.

۴- لایه انتقال دهنده حفره (HTM) به ضخامت ۲۰۰ نانومتر است که معمولاً از ترکیب پلیمری Spiro-OMeTAD استفاده می‌شود.

۵- الکتروود پشتی (کاتد) از جنس طلا یا نقره به ضخامت ۶۰ نانومتر تشکیل شده است که می‌تواند با ترکیبات دیگر همچون کربن جایگزین شود.

۲-۱-۲ سلول خورشیدی رنگدانه‌ای (DSSC)

قلب سلول خورشیدی رنگدانه‌ای یک لایه مزومتخلخل از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با میانگین اندازه ذرات ۲۰ نانومتر است که روی شیشه حاوی لایه نازکی از



شکل ۲- طرحی از اجزای سازنده سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

رفته و در آنجا دوباره به I^- تبدیل می‌شوند. برای تسریع این مرحله از پوشش پلاتین بر روی کاتد شمارنده استفاده می‌شود.

۲-۱-۳- سلول خورشیدی نقاط کوانتومی

توانایی تزریق الکترون و قابلیت تنظیم شکاف انرژی، از جمله ویژگی‌هایی هستند که نقاط کوانتومی را برای استفاده در سلول‌های خورشیدی مناسب می‌سازند. اولین تلاش‌ها برای استفاده از نقاط کوانتومی در سلول‌های خورشیدی مربوط به جایگزینی آن‌ها به جای رنگدانه در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای بود (Quantum dot sensi-tized solar cells). امروزه ساختارهای مختلفی از سلول خورشیدی پیشنهاد شده است که در آن‌ها لایه‌های نازکی از انواع نقاط کوانتومی مانند سرب سولفاید، کادمیم سلناید و کادمیم تلوراید استفاده می‌شود که از میان آن‌ها می‌توان به سلول‌های خورشیدی شاتکی (Schottky)، چنداتصاله (Multi-junction)، پیوند ناهمگن توده‌ای (Bulk heterojunction) و ناهمگن تهی شده (Depleted heterojunction) اشاره کرد.

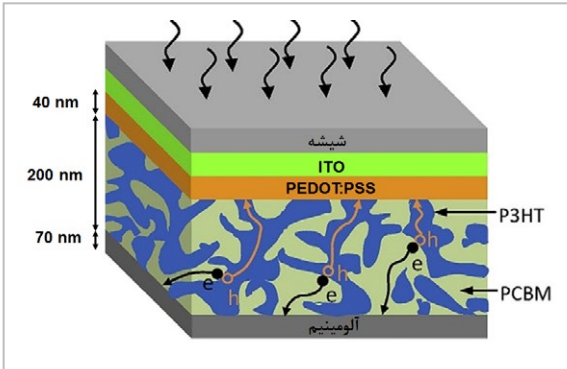
۲-۱-۴- سلول خورشیدی پلیمری

مهم‌ترین قابلیت سلول‌های خورشیدی پلیمری آن است که می‌توانند روی زیرلایه‌های منعطف لایه‌نشانی شوند. اجزای اصلی این سلول‌ها مطابق شکل ۳ عبارتند از:

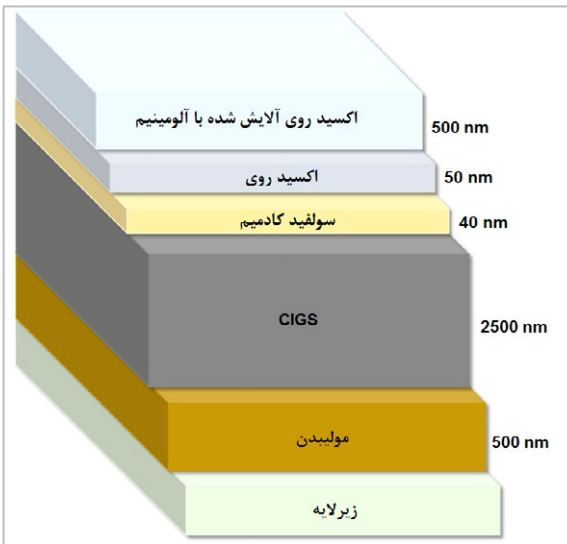
۱- زیرلایه منعطف که معمولاً از جنس فویل پلی‌اتیلن تترافتالات (PET) انتخاب می‌شود.

اکسید قلع آلایش شده با فلورین (FTO) لایه‌نشانی می‌شود. ذرات رنگدانه (معمولاً $N=719$) روی سطح این نانوذرات قرار گرفته و وظیفه تزریق الکترون به سیستم را بر عهده دارند. در بین لایه مزومتخلخل و شیشه هادی، لایه نازکی به ضخامت ۵۰ نانومتر از دی‌اکسید تیتانیم تهیه می‌شود که به عنوان لایه سدکننده مانع بازگشت الکترون به شیشه هادی می‌شود. از شیشه FTO پوشش داده شده با پلاتین نیز به عنوان الکتروود پشتی (کاتد) استفاده می‌شود. در بین دو الکتروود آند و کاتد، الکترولیت محتوی زوج اکسنده-کاهنده I^-/I_3^- قرار می‌گیرد. شماتیک اجزای سازنده این دسته از سلول‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. سلول خورشیدی رنگدانه‌ای به عنوان یک پیل الکتروشیمیایی از طریق مراحل زیر انرژی نورانی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند:

- ۱- نور خورشید از طریق شیشه FTO وارد سلول شده و به رنگدانه‌های روی سطح تیتانیا برخورد می‌کند.
- ۲- فوتون‌های ورودی جذب شده و رنگدانه را تهییج می‌کنند. الکترون‌ها به پایین‌ترین اوربیتال مولکولی اشغال نشده^۵ رنگ (LUMO) منتقل و در بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده^۶ رنگ (HOMO) حفره ایجاد می‌شود.
- ۳- الکترون‌ها به درون نوار هدایت TiO_2 تزریق و به خاطر وجود شیب غلظت به سطح مشترک FTO/ TiO_2 نفوذ و توسط مدار خارجی به سمت کاتد حرکت می‌کنند.
- ۴- از آنجا که مولکول‌های رنگدانه الکترون از دست داده‌اند، نیاز دارند که الکترون دیگری جذب کنند. پس الکترون موردنیاز خود را از الکترولیت تامین می‌کنند. بدین ترتیب که کاتیون‌های رنگدانه تولید شده به وسیله I^- احیا می‌شوند و یون‌های I_3^- تشکیل می‌شوند و در نهایت الکترون‌های ایجاد شده HOMO رنگدانه می‌روند.
- ۵- یون‌های I_3^- تولید شده به سمت کاتد



شکل ۳- طرحی از اجزای سازنده سلول خورشیدی پلیمری



شکل ۴- طرحی از لایه‌های نازک سلول خورشیدی CIGS

آنکه این ترکیب سمیت کمتری نسبت به CIGS دارد، عناصر موجود در آن به وفور در طبیعت یافت می‌شوند.

۲-۱-۷- سلول‌های خورشیدی کادمیم‌تولراید (CdTe)

لایه جاذب این دسته از سلول‌های خورشیدی لایه‌ای به ضخامت ۱۰ میکرون از کادمیم‌تولراید به صورت نیمه‌هادی غیرذاتی نوع p است. مطابق شکل ۵ سایر لایه‌های به‌کاررفته در سلول‌های خورشیدی کادمیم‌تولراید عبارت‌اند از:

- ۱- شیشه رسانای هادی: معمولاً از شیشه‌های حاوی لایه اکسید قلع ایندیم (ITO) به عنوان الکترود جلویی استفاده می‌شود.

- ۲- نیمه‌هادی کادمیم‌سولفید (CdS) پلی‌کریستالی نوع n با ضخامت ۱۰۰ نانومتر که به عنوان لایه پنجره عمل می‌کند.

- ۲- لایه نازک اکسید قلع ایندیم (ITO) به ضخامت ۱۵۰ نانومتر که نقش آند را بازی می‌کند.

- ۳- لایه نازک PEDOT:PSS به ضخامت ۴۰ نانومتر که به عنوان لایه مسدودکننده الکترون به انتقال حفرات به آند کمک می‌کند.

- ۴- از P3HT و PBCM به ترتیب به عنوان ماده پذیرنده حفره و الکترون و به صورت لایه نازک ترکیبی از P3HT:PBCM به ضخامت ۲۰۰ نانومتر تهیه می‌شود.

- ۵- الکترود پشتی از جنس آلومینیم با ضخامت ۸۰ نانومتر لایه نشانی می‌شود.

۲-۱-۵- سلول‌های خورشیدی مس ایندیم‌گالیوم

-سلناید (CIGS)

مس ایندیم‌گالیوم سلناید ($(\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$) یک نیمه‌هادی نوع p است که به صورت لایه نازکی با ضخامت ۲٫۵ میکرون به عنوان لایه جاذب نور در سلول‌های خورشیدی به‌کار می‌رود. سایر لایه‌های ایجاد شده در این دسته از سلول‌ها مطابق شکل ۴ و به شرح زیر هستند:

- ۱- مولیبدن به ضخامت ۵۰۰ نانومتر که به روش اسپاترینگ روی شیشه لایه نشانی می‌شود.

- ۲- نیمه‌هادی سولفید کادمیم از نوع n به ضخامت ۴۰ نانومتر تهیه می‌شود که به عنوان لایه بافر نقش پنجره را در مقابل عبور نور بازی می‌کند.

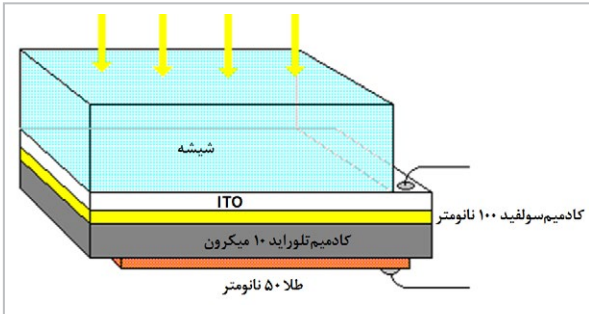
- ۳- لایه نازکی از نیمه‌هادی ذاتی اکسیدروی به ضخامت ۵۰ نانومتر ایجاد می‌شود که از ایجاد آسیب به لایه‌های سولفید کادمیم و CIGS در حین فرآیند لایه نشانی الکترود پشتی ممانعت کند.

- ۴- لایه اکسیدروی آلوده شده با آلومینیم (AZO) به ضخامت ۵۰۰ نانومتر که به عنوان الکترود پشتی لایه نشانی می‌شود.

۲-۱-۶- سلول خورشیدی مس روی قلع‌گوگرد

(SZTS)

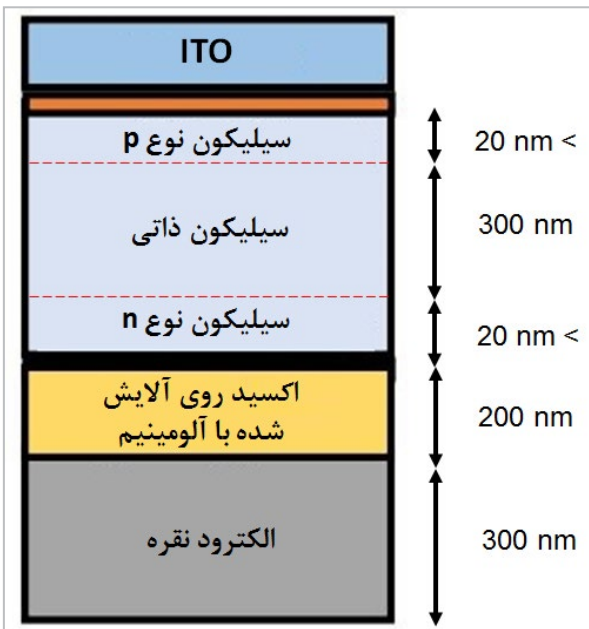
مکانیزم عمل و شاکله کلی این سلول‌ها مشابه سلول‌های CIGS است با این تفاوت که لایه مس روی قلع‌گوگرد (SZTS) با فرمول شیمیایی $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ جایگزین CIGS می‌شود. علت تمایل محققان به استفاده از این ترکیب آن است که علاوه بر



شکل ۵- طرحی از لایه‌های نازک سلول خورشیدی کادمیم‌تلورید

طلا	
GaAs	
پنجره	n-Al _{0.52} In _{0.48} P: Se (20 nm)
منتشر کننده	n-Ga _{0.51} In _{0.49} P: Se (100 nm)
لایه پایه	p-GaInAsP: Zn
BSF	p+ GaInAsP: Zn (100 nm)
الکتروود پشتی	Al _{0.5} Ga _{0.5} As: C (200 nm)
طلا	

شکل ۶- طرحی از لایه‌های نازک سلول خورشیدی گالیم‌آرسناید



شکل ۷- شماتیک لایه‌های نازک در سلول خورشیدی سیلیکون آمورف

۳- آلومینیم یا طلا با ضخامت ۵ نانومتر که به عنوان الکتروود پشتی لایه‌نشانی می‌شود.

۲-۱-۸- سلول خورشیدی گالیم‌آرسناید (GaAs)

این دسته از سلول‌های خورشیدی کارآمد که به علت بالا بودن هزینه ساخت آن‌ها عمدتاً در کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر پایه لایه‌های نازک تک کریستالی از نیمه‌هادی‌های گالیم‌آرسناید نوع n و p تهیه می‌شوند. تاکنون ساختارهای بسیاری برای این سلول‌ها پیشنهاد شده است که در شکل ۶ اجزای اصلی سازنده آن‌ها آورده شده است.

۲-۱-۹- سلول خورشیدی سیلیکون آمورف

نقش فناوری نانو در سلول‌های خورشیدی سیلیکون آمورف (a-Si) ایجاد اتصال p-i-n از طریق لایه‌های نازک سیلیکون نوع n و p با ضخامت‌های کمتر از ۲۰ نانومتر است. دیگر لایه‌های نازک به کار گرفته شده در این دسته از سلول‌های خورشیدی لایه سیلیکون ذاتی با ضخامت ۳۰۰ نانومتر، لایه اکسید ایندیم قلع (ITO) با ضخامت ۱۵۰ نانومتر، لایه اکسیدروی آلایش شده با آلومینیم (AZO) با ضخامت ۲۰۰ نانومتر و الکتروود نقره با ضخامت ۳۰۰ نانومتر هستند (شکل ۷). ضخامت نهایی پیل‌های مونتاژ شده بر پایه این سلول‌ها می‌تواند تا ۳۰۰ برابر نسبت به سلول‌های سیلیکونی بلوری کمتر باشد. برای تهیه لایه‌های نازک سیلیکون آمورف معمولاً از روش‌های تبخیری مانند رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار به کمک پلاسما (PECVD) استفاده می‌شود.

۲-۲- پوشش‌های بر پایه فناوری نانو

۲-۲-۱- پوشش‌های آنتی‌استاتیک، خودتمیز-شونده و آب‌گریز

کاربرد عمده فناوری نانو در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی تجاری موجود در بازار مربوط به پوشش‌های لایه‌نازک آنتی‌استاتیک،

حفظ و نگهداری و افزایش مقاومت در برابر عوامل مهاجم خارجی مانند سایش و فرسایش اشاره کرد. پلی‌وینیلیدن فلورید (PVDF)، ارگانوسیلان‌ها و نیمه‌هادی‌هایی چون دی‌اکسیدتیتانیوم بیشترین کاربرد را در این زمینه دارند.

۲-۲-۲- پوشش‌های ضدانعکاس منیزیم فلورید

یکی از چالش‌های مهم در مسیر دست‌یابی به سلول‌های خورشیدی با بازدهی بالا ضربه‌ی انعکاس زیاد مواد سازنده آن‌ها است که باعث اتلاف بخشی از توان ورودی می‌شود. این مشکل در سلول‌های سیلیکونی و CIGS خود را به خوبی نشان می‌دهد. برای رفع این مشکل از لایه‌های نازک ضدانعکاس (ARC) استفاده می‌شود. منیزیم فلورید (MgF_2) یک ترکیب با ضربه‌ی انعکاس بسیار پایین است که در محدوده طول موج ۱۲۰ تا ۹۰۰ نانومتر کارایی خوبی از خود نشان می‌دهد. این ترکیب به صورت لایه‌نازکی با ضخامت ۷۰ تا ۱۲۰ نانومتر و با استفاده از روش‌های تبخیری روی سطح بالایی سلول‌های خورشیدی قرار می‌گیرد. از دیگر مواد مورد استفاده در این خصوص می‌توان به دی‌اکسید تیتانیوم، سولفید روی و نیتريد سیلیکون اشاره کرد. اطلاعات بیشتر درباره سلول‌های خورشیدی نانو ساختار در سایت شبکه انرژی خورشیدی نانو به نشانی <https://solar.nanoindustry.ir> منتشر شده است.

خودتمیزشونده و آب‌گریز است. در شرایط کاری به علل مختلف مانند گردوغبار، باران، مدفوع پرندگان و ترکیبات شیمیایی موجود در هوا (دی‌اکسید گوگرد، مونوکسیدکربن، سرب و اکسیدهای نیتروژن) آلودگی‌هایی روی سطح سلول‌های خورشیدی ایجاد می‌شود که مانع از رسیدن کامل نور خورشید به لایه‌جاذب آن می‌شود. تنها ۴ گرم خاک در هر یک مترمربع سلول خورشیدی می‌تواند بازدهی آن را در تبدیل انرژی نورانی به الکتریکی تا ۴۰ درصد کاهش دهد. به علاوه در عمل، تمیز کردن سطح سلول‌ها با مشکلات متعددی توأم است زیرا نیاز است تا به صورت هفتگی سطح ماژول‌ها با استفاده از مواد شوینده تمیز شود که هزینه‌بر و زمان‌بر است و نیاز به نیروی انسانی دارد. همچنین مواد شوینده می‌توانند به راحتی باعث خوردگی فریم سلول شده و به آن آسیب بزنند. به همین علت بسیاری از شرکت‌های تولیدی به سوی استفاده از محلول‌های حاوی نانوذرات رفته‌اند که نه تنها ارزان هستند بلکه دوام خوبی نیز در شرایط عملی دارند. این محلول‌ها که به صورت لایه‌نازک با ضخامت زیر ۱۰۰ نانومتر روی سطح قرار می‌گیرند، وظیفه حفاظت از سلول، افزایش عمر مفید و بهبود بازدهی آن را برعهده دارند. استفاده از این محلول‌ها سطح را از تمیز کردن بی‌نیاز نمی‌کند بلکه در عمل قابلیت خودتمیزشوندگی و آسان‌تمیزشوندگی به آن داده و بازه‌های زمانی نظافت را افزایش می‌دهند. از دیگر مزایای این محلول‌ها می‌توان به کاهش هزینه

پی‌نوشت‌ها

1. National Renewable Energy Laboratory (NREL)
2. Methyammonium Lead Halide Perovskites
3. Fluorine Doped Tin Oxide (FTO) Glass
4. Blocking Layer
5. Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO)
6. Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO)

منابع

1. National Renewable Energy Laboratory (NREL) chart, nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg, accessed: 03 Jan 2019.
2. F. Bella, G. Griffini, J.P. Correa-Baena, G. Saracco, M. Grätzel, A. Hagfeldt, S. Turri, C. Gerbaldi, Improving efficiency and stability of perovskite solar cells with photocurable fluoropolymers, *Science* 354 (6309) (2016) 203-206.
3. S. T. Williams, A. Rajagopal, C. C. Chueh, A. K. Y. Jen, Current Challenges and Prospective Research for Upscaling Hybrid Perovskite Photovoltaics, *J. Phys. Chem. Lett.* 7 (2016) 811-819.
4. N.J. Jeon, J.H. Noh, Y.C. Kim, W.S. Yang, S. Ryu, S. Il Seok, Solvent engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells, *Nature Materials*. 13 (9) (2014) 897-90.
5. N. Pellet, P. Gao, G. Gregori, Y. Y. Yang, M. K. Nazeeruddin, J. Maier, M. Grätzel, Mixed-Organic-Cation Perovskite