فناوری سلول خورشیدی رکتنی از تئوری تا عمل

وحید خوشدل/ دانشجوی دکتری مخابرات میدان، دانشگاه فردوسی مشهد
v.khoshdel3380@gmail.com،
مهرداد شکوه صارمی/ دانشیار گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد،
m_saremi@um.ac.ir

چکیده
تقاضا برای استفاده از فن‌آوری‌های جمع‌آوری انرژی خورشیدی به شکل روز افزونی در حال افزایش است. یکی از این فن‌آوری‌ها، سلول‌های خورشیدی هستند که از آنها برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی و تولید الکتریسیته استفاده می‌شود. از اصلی‌ترین معایب این فن‌آوری، راندمان پایین و وابستگی شدید آن به نور روز و تغییرات شرایط آب و هوایی است. علاوه بر این، آنها به یک سیستم مکانیکی ردیاب خورشیدی جهت افزایش راندمان خود نیاز دارند. طی سالیان اخیر اقدامات قابل توجهی برای جایگزینی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک با نانوآنتن‌های نوری برای غلبه بر معایب سلول‌های خورشیدی فعلی صورت گرفته است. ایده جمع‌آوری انرژی خورشیدی و تشعشعات زمینی با استفاده از نانوآنتن‌ها بر این اساس است که هنگامی‌که موج الکترومغناطیسی خورشیدی به یک نانوآنتن برخورد می‌کند، یک جریان متغیر با زمان بر روی سطح نانوآنتن ایجاد شده و در نتیجه ولتاژی در محل تغذیه آن تولید می‌شود، از این رو با جایگذاری یکسوسازی مناسب در محل تغذیه نانوآنتن، توان DC مطلوب تولید می‌گردد. به این گونه سیستم‌های جمع‌آوری انرژی خورشیدی که شامل یک آنتن و یک یکسوساز است، رکتن می‌گویند. با توجه به فراهم بودن فناوری لازم برای ساخت ساختارهای با ابعاد نانو، امروزه امکان ساخت نانوآنتن‌ها امکان‌پذیر شده است. در این مقاله ما به بررسی و معرفی سیستم رکتن خورشیدی جهت جمع‌آوری انرژی خورشیدی می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: رکتن، نانوآنتن، یکسوساز

۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر شاهد افزایش روزافزون وابستگی بشر به انرژی بوده‌ایم، در حالی که انرژی اصلی مصرفی انسان‌ها سوخت‌های فسیلی بوده، اما با توجه به تجدیدناپذیر بودن و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از این سوخت‌ها، انسان همواره به دنبال سوختی پاک و تمام نشدنی بوده است. یکی از این گزینه‌ها استفاده از انرژی خورشید است. انرژی خورشیدی که بزرگترین منبع انرژی می‌باشد، پس از عبور از جو به سطح زمین می‌رسد. انرژی‌ای که از طریق خورشید به زمین می‌رسد ۱۰۰۰۰ بار بیشتر از انرژی مورد نیاز انسان است. مصرف انرژی در سال ۲۰۵۰ یعنی سال ۱۴۲۹ خورشیدی (۳۴ سال دیگر) ۵۰ تا ۳۰۰ درصد بیشتر از مصرف امروزی آن خواهد بود. با این حال اگر فقط ۰/۱ درصد از سطح زمین با مبدل‌های انرژی خورشیدی پوشیده شوند و تنها ۱۰ درصد بازده داشته باشند، انرژی مورد نیاز بشر تامین می‌شود. چگالی توان تشعشعی تابش خورشیدی که وارد جو زمین می‌شود تقریبا برابر $1370\ W/m^2$ می‌باشد[۱]. این طیف تشعشعی خورشید دارای باند فرکانسی بسیار وسیعی است که به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

تابش فرابنفش با طول موج‌های $\lambda < 400\ nm$ (فرکانس‌های بیشتر از ۷۵۰ تراهرتز) که شامل ۹ درصد طیف فرکانسی می‌باشد، نور مرئی با طول‌موج $400\ nm < \lambda < 700\ nm$ (فرکانس‌های بین ۴۲۸ تا ۷۵۰ تراهرتز) که شامل ۳۹ درصد طیف و بالاخره فروسرخ با طول موج $700\ nm < \lambda < 1000\ \mu m$ (فرکانس‌های بین ۰/۳ تا ۴۲۸ تراهرتز) که شامل ۵۲ درصد طیف فرکانسی تابش خورشیدی است. هرچند همه تابش خورشیدی به زمین نمی‌رسد اما تابش‌هایی که به زمین می‌رسند شامل مقدار زیادی انرژی هستند. این انرژی

توسط هر شی بر روی کره‌زمین جذب و به گرما تبدیل می‌شود. از زمان شناخت پدیده فتوولتاییک در اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی رشد و توسعه این فناوری با سرعت بسیار بالایی ادامه داشته است. در حال حاضر دو فناوری عمده براساس استفاده از سیلیکون و لایه‌های نازک در ساخت سلول‌های خورشیدی رواج دارند. سلول سیلیکون بلوری که نخستین نسل از سلول‌های خورشیدی است به دو صورت تک بلوری و چند بلوری تولید می‌شود. این فناوری هر چند امروزه بیشترین استفاده را در بازار سیستم‌های فتوولتاییک دارد اما از معایب آن می‌توان به هزینه تولید بسیار زیاد آن اشاره کرد. در فناوری سلول خورشیدی لایه نازک هر چند هزینه تولید کاهش یافته است اما به نسبت فناوری سیلیکونی از بازدهی کمتری برخوردار است، طوریکه بهترین بازده آزمایشگاهی به‌دست آمده از این روش از ۲۰ درصد فراتر نمی‌رود. با توجه به اینکه این نوع فن‌آوری سلول‌های خورشیدی به‌علت راندمان پایین به خوبی پوشش دهنده نیازهای تجاری نبوده است، صنعت فتوولتاییک در حوزه تجاری نیاز به فن‌آوری‌هایی با بهره بالاتر و قیمت ارزان‌تر پیدا کرده است. راه حلی که در این حوزه جهت افزایش بهره‌وری در فناوری سلول‌های خورشیدی پیشنهاد شده است، استفاده از نانوآنتن‌های نوری به همراه یکسوسازی مناسب در محل تغذیه نانوآنتن می‌باشد که تشکیل دهنده یک مجموعه به نام رکتن (rectifier+antenna = rectenna) است. راندمان سلول‌های خورشیدی معمولی در بهترین حالت حدود ۳۰ درصد است، در حالی که با استفاده از این نانوآنتن‌ها راندمان تئوری تا بیش از ۸۵ درصد قابل دسترسی است[۲].

ایده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته اولین‌بار در سال ۱۹۷۲ توسط دانشمندی به نام بیلی(Bailey) مطرح گردید[۳]. این ایده تا سال ۲۰۰۵ به دلیل عدم توانایی ساخت ساختارهای با ابعاد نانو در مقیاس تجاری مورد توجه قرار نگرفت. اما در طی سالیان اخیر با توجه به پیشرفت فناوری نانو و امکان ساخت آنتن‌ها و یکسوکننده‌های نانومتری، سیستم رکتن خورشیدی به‌عنوان جایگزینی برای پنل‌های فتوولتاییک فعلی جهت تولید الکتریسیته پیشنهاد شده است. میلیون‌ها عدد نانوآنتن به همراه یکسوساز مناسب در سیستم رکتن خورشیدی در کنار یکدیگر به‌صورت آرایه‌ای قرار می‌گیرند تا توان DC مطلوب تولید گردد، در شکل (۱) یک سیستم رکتن خورشیدی با استفاده از نانوآنتن‌های دوقطبی نشان داده شده است.

سیستم رکتن خورشیدی با جذب انرژی تابیده شده از طرف زمین (تشعشعات زمینی) در طول موج‌های نزدیک ۱۰ میکرومتر، در طی شب هم می‌تواند کارایی داشته باشد. علاوه بر این از آنجایی که نانوآنتن‌ها ویژگی جذب زاویه وسیعی دارند، به سیستم ردیاب خورشیدی جهت تعقیب کردن مسیر خورشید نیازی ندارند.

در این مقاله به معرفی سلول خورشیدی رکتنی و نحوه عملکرد آن پرداخته شده است.

۲- ساختار و تئوری عملکرد

همانند آنتن‌های رادیویی و مایکروویوی، نانوآنتن‌های نوری به موج الکترومغناطیسی (نور مرئی و فروسرخ) پاسخ می‌دهند. با تحریک یک جریان AC بر روی سطح آنتن یک میدان الکتریکی در محل حفره تغذیه آنتن متمرکز می‌شود، این میدان بزرگ در محل حفره آنتن به‌وسیله یک یکسوساز می‌تواند به یک توان DC تبدیل گردد. هنگامی‌که یک میدان الکتریکی تابشی E^i به سطح آنتن برخورد می‌کند، کل میدان الکتریکی مماسی E^t برابر است با:

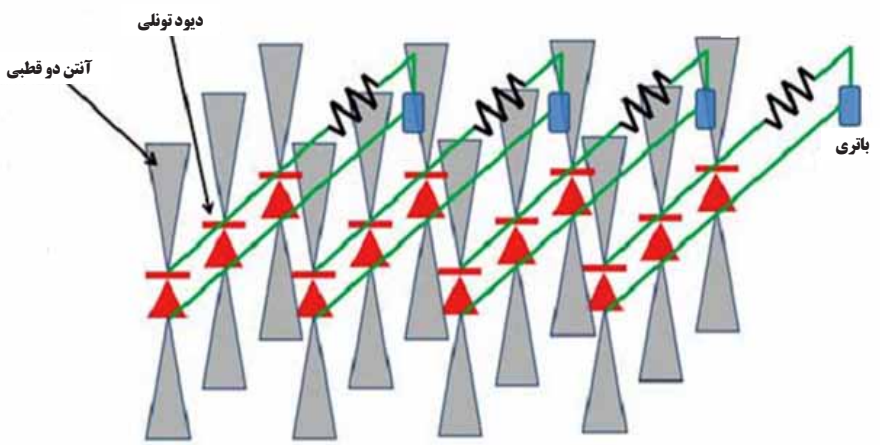
$$E^t = E^i + E^s$$

که در این رابطه E^s میدان الکتریکی پراکنده شده می‌باشد. براساس قانون شرایط مرزی الکترومغناطیس، میدان الکتریکی مماسی روی سطح آنتن صفر است، یعنی $E^t = 0$. این قاعده برای آنتن‌های معمولی که در فرکانس‌های رادیویی و مایکروویوی کار می‌کنند برقرار است چرا که در این حالت فلزات رساناهای کاملی در نظر گرفته می‌شوند و داریم $E^s = -E^i$. اما این قاعده برای آنتن‌های نوری که در فرکانس‌های نوری و فروسرخ کار می‌کنند به‌دلیل اینکه فلزات در این فرکانس‌ها رساناهای کاملی نیستند دیگر برقرار نیست. فلزات در این فرکانس‌ها رسانندگی کمتری از خود نشان داده و ویژگی‌های دی‌الکتریک وابسته به فرکانس دارند. گذردهی الکتریکی نوری فلزات در این حالت مشابه سیستم‌های رادیویی و مایکروویوی نبوده و طبق مدل درود (Drude model) به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد[۲]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty - \frac{f_p^{\,2}}{\left(f^2 + j f_p \Gamma\right)} \qquad (۲)$$

در این رابطه ε_∞ بیانگر ثابت دی‌الکتریک در فرکانس‌های بالا، f_p فرکانس پلاسماو Γ فرکانس میرایی است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود ثابت دی‌الکتریک ε_r وابسته به فرکانس می‌باشد.

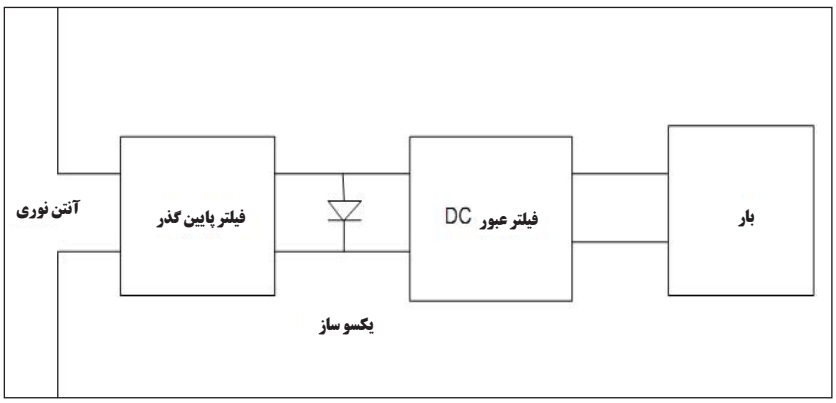
بلوک دیاگرام یک نمونه سیستم رکتن خورشیدی در شکل(۲) نشان داده شده است. در این سیستم، نانوآنتن وظیفه دریافت موج الکترومغناطیسی خورشیدی در یک باند فرکانسی مشخص و تحویل



شکل ۱: طرح شماتیک یک مجموعه رکتن خورشیدی متشکل از نانوآنتن‌های دوقطبی

آن به یک فیلتر پایین‌گذر را دارد. فیلتری که بین نانوآنتن و یکسوساز قرار دارد سیگنال‌های تراهرتزی تولیدی را عبور داده و با جلوگیری از تابش مجدد هارمونیک‌های بالاتر تولیدی توسط فرآیند یکسوسازی، موجب کاهش تلفات می‌شود. سیگنال یکسو شده پس از عبور از فیلتر عبور DC به سمت بار منتقل می‌شود.

انتخاب یکسوساز مناسب برای سیستم رکتنی براساس فرکانس کاری آن می‌باشد. در فرکانس ۳۵ گیگا هرتز دیودهای شاتکی (Schottky) گالیم آرسنایدطراحی شده‌اند. هرچند این دیودها در فرکانس‌های ابعاد نانومتر نیاز است. از آنجایی که استفاده از نانوآنتن‌های نوری برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی ارایه دهنده یک راه‌حل عملی با راندمان بالا نسبت به سایر فناوری‌های فتوولتاییک رایج مثل پنل‌های خورشیدی است، منجر به توسعه سریعی در صنعت نانو و مواد نوری گشته است. نانوآنتن‌ها کاربرد های زیادی در ناحیه فرکانسی نور مرئی و فروسرخ دارند به همین دلیل توانایی افزایش بر هم کنش بین امواج نوری با مواد با مقیاس نانو را فراهم می‌سازند[۴]. آنتن‌های نوری یا همان نانوآنتن‌ها ایده‌ای نو در فیزیک نوری هستند،

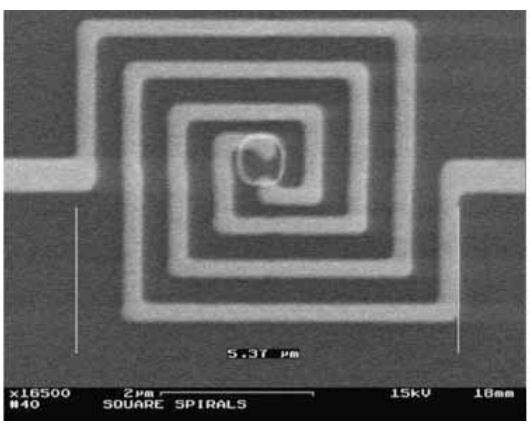


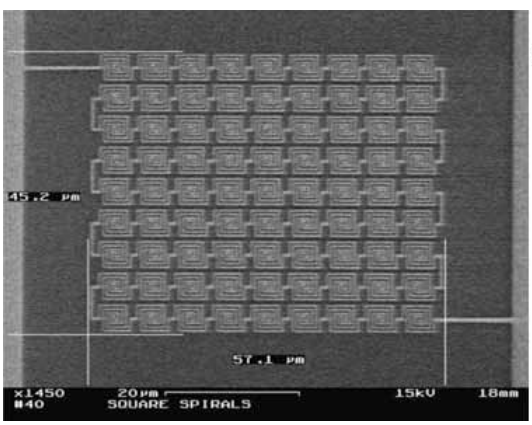
شکل۲: بلوک دیاگرام یک سیستم رکتن خورشیدی

فروسرخ و تراهرتز هم به کار می‌روند. برای فرکانس‌های بیش از ۱۲ تراهرتز دیودهای پاسخ سریع MIM (Metal-Insulator-Metal) پیشنهاد شده‌اند. دیود MIM یک قطعه فیلم نازک متشکل از یک لایه عایقی با ضخامت چند نانومتر که بین دو الکترود فلزی پیچیده شده، می‌باشد. جهت تطبیق امپدانسی و در نتیجه افزایش راندمان سیستم، مقاومت آنتن نزدیک به مقاومت دیود در نظر گرفته می‌شود. حال به تفکیک به بررسی هر یک از قسمت های سیستم رکتن خورشیدی می‌پردازیم.

۲-۱- نانوآنتن

آنتن وسیله‌ایست که می‌تواند موج الکترومغناطیسی موجود در فضا را دریافت کند. جهت دریافت موج الکترومغناطیسی خورشیدی توسط آنتن بایستی ابعاد آنتن در مرتبه‌ای از اندازه طول‌موج ورودی به سطح آن باشد لذا جهت دریافت تابش‌های خورشیدی که طول‌موج‌های ناحیه فروسرخ، مرئی و فرابنفش را شامل می‌شوند به آنتنی با و عملکردشان مشابه آنتن‌های رادیویی و مایکروویوی است. هدف در آنتن‌های نوری تبدیل انرژی تشعشع فضای آزاد به یک انرژی محلی شده و برعکس است. در شکل(۳) یک نوع از نانوآنتن‌ها نشان داده شده است. از آنجایی که استفاده از آنتن‌های نوری برای جمع آوری انرژی خورشیدی ارایه دهنده یک راه حل عملی با راندمان بالا نسبت به سایر فناوری‌های فتوولتاییک رایج مثل پنل‌های خورشیدی است، منجر به توسعه سریعی در صنعت نانو و مواد نوری گشته است. آنتن‌های نوری کاربردهای زیادی در ناحیه فرکانسی نور مرئی و فروسرخ دارند به همین خاطر توانایی افزایش بر هم کنش بین امواج نوری با مواد با مقیاس نانو را فراهم می‌سازند. آنتن نوری ایده‌ای نو ظهور در فیزیک نوری است. مشابه آنچه درآنتن‌های رادیویی و مایکروویوی وجود دارد، هدف در آنتن‌های نوری یا نانوآنتن ها تبدیل انرژی تشعشع فضای آزاد به یک انرژی محلی شده و برعکس است. آنتن نوری شباهت زیادی با همتای رادیویی خود دارد، اما در کنار





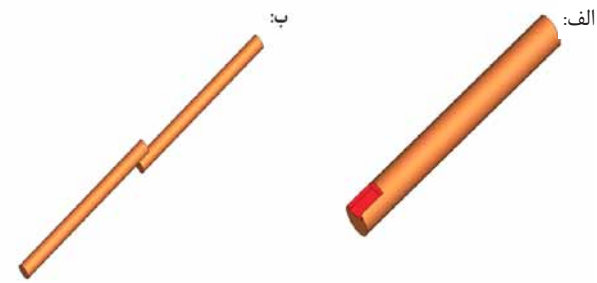
شکل۳: (الف) نانوآنتن مارپیچی متصل به یکسوساز و (ب) آرایه‌ی دو بعدی نانوآنتن‌های مارپیچی جهت جمع‌آوری انرژی خورشیدی[۵]

این شباهت‌ها تفاوت‌های زیادی مثل تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و ابعاد با یکدیگر دارند. اکثر این تفاوت‌ها بر گرفته از این حقیقت است که فلزات، رساناهای کاملی در فرکانس‌های نوری نیستند.

۲-۲- یکسوساز نانومتری

همان‌طور که ذکر شد، جهت تبدیل سیگنال ورودی از نانوآنتن به توان DC بایستی یکسوساز مناسبی به نانوآنتن متصل گردد. در حال حاضر یکسوسازی که بتواند در فرکانس‌های خیلی بالا (بیش از ۳۰ تراهرتز) کار کند، وجود ندارد. دیود شاتکی (Schottky diode)که یک دیود نیمه‌هادی با افت ولتاژ پایین و سرعت پاسخ‌دهی به نسبت سریع می‌باشد، توانایی یکسوسازی و آشکارسازی سیگنال‌های با فرکانس تا ۵ تراهرتز را دارد[۶]. متداول‌ترین یکسوساز مورد استفاده در سلول خورشیدی رکتنی دیود MIM (Metal-Insulator-Metal) است، این دیود شامل یک لایه‌ی عایقی نازک به ضخامت چند نانومتر است که بین دو صفحه‌ی الکترود فلزی قرار گرفته است[۶]. یکسوسازی سیگنال‌های ورودی بر اساس فرآیند تونل‌زنی الکترون در طول لایه‌ی عایقی اتفاق می‌افتد. دیود MIM به دلیل زمان تونل‌زنی فمتوثانیه‌ی یک الکترون در طول یک سد و افزایش چشم‌گیر سرعت پاسخ‌دهی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای دیود شاتکی در ناحیه‌ی فرکانسی فروسرخ و مرئی به کار رود[۶]. دیودهای MIM عملکرد قابل قبولی را در تبدیل سیگنال‌های تراهرتزی به خروجی DC از خود نشان داده‌اند.

جهت ساخت چنین دیودی، در یک بازوی نانوآنتن دوقطبی یک خراشیدگی به اندازه‌ی ۵۰×۵۰ نانومتر مربع جهت ایجاد فضایی برای قرارگیری دیود MIM طبق شکل (۴- الف) ایجاد شده است. دو بازوی دوقطبی بر روی یک ناحیه به مساحت ۵۰×۵۰ نانومتر مربع طبق شکل (۴- ب) هم‌پوشانی دارند. اگر فضای ایجاد شده بین دو بازوی نانوآنتن دوقطبی توسط یک ماده‌ی عایقی با ثابت دی‌الکتریک ۸ و ضخامت ۲۰ نانومتر پر گردد، ساختار ایجاد شده یک رکتن خورشیدی متشکل از نانوآنتن‌های دوقطبی و یکسوساز دیودی MIM است.



شکل۴: (الف) خراشیدگی به وجود آمده بر روی بازوی نانوآنتن دوقطبی جهت ایجاد فضایی برای دیود MIM، (ب) نانوآنتن دوقطبی روی هم افتاده به

۳- مزایا و برتری سلول خورشیدی رکتنی به نسبت فناوری‌های امروزی

مهمترین مزیت و برتری فناوری سیستم رکتن خورشیدی به نسبت فناوری‌های امروزی بازده بالاتر آن می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد بازده یک سلول خورشیدی رکتنی به‌صورت تئوری تبه مقدار بیش از ۸۵ درصد قابل دسترسی است در حالی که این مقدار برای فناوری‌های امروزی از ۳۰ درصد فراتر نمی‌رود. از آنجایی که نانوآنتن‌ها توانایی جذب زاویه‌ای وسیعی دارند به سیستم ردیاب خورشیدی جهت تعقیب کردن مسیر خورشیدی نیازی ندارند به همین دلیل حتی در صورت تابش مایل خورشیدی به سطح صفحه خورشیدی میزان بازده آنها تا حد قابل توجهی حفظ می‌شود. این سیستم همچنین می‌تواند انرژی تابیده شده از طرف زمین یا همان تشعشعات زمینی که ناشی از تابش‌های روزانه خورشید به سطح زمین هستند و در طول‌موج‌های ۱۰ میکرومتر (در فرکانس‌های ۳۰ تراهرتز) رخ می‌دهند را جذب کند، به همین دلیل نانوآنتن‌های سیستم رکتن خورشیدی با جمع‌آوری این تشعشعات در طی شب و یا در شرایط آب و هوایی بد هم می‌تواند به تولید انرژی الکتریکی بپردازد. سلول خورشیدی رکتنی پتانسیل لازم برای کم هزینه‌تر بودن به نسبت سلول‌های خورشیدی معمولی فعلی را دارد. لایه‌های فلزی و عایقی به کار رفته در این سیستم به فرم فیلم‌های بسیار نازکی هستند که هزینه بالایی ندارند، همچنین زیرلایه‌های به کار رفته اغلب از جنس شیشه یا پلاستیک هستند که امکان ساخت آنها با هزینه پایین وجود دارد. در حال حاضر ساختارهای دیودی و آنتنی به کار رفته در رکتن خورشیدی با استفاده از روش طرح نگار الکترونی (Electron beam lithography) ساخته می‌شوند. هرچند این روش ساخت برای تولید در مقیاس‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی پر هزینه و وقت گیر است اما اگر این ساختارها در حجم وسیع و با روش مناسب تولید گردند، موجب کاهش هزینه و سرعت در فرآیند ساخت می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ما با اصول و تئوری عملکرد سیستم رکتن خورشیدی جهت تولید الکتریسیته از نور خورشید آشنا شدیم، هر چند این فن‌آوری همچنان در مرحله تحقیقاتی و مطالعاتی قرار دارد و تا تجاری سازی شدن آن راه زیادی باقی است اما با توجه به پوشش مناسب معایب سلول‌های خورشیدی فعلی از جمله راندمان پایین آنها توسط این فناوری و از طرفی پیشرفت فناوری نانو در جهت ساخت و تولید آنتن ها و یکسوکننده های نانومتری بایستی در آینده‌ای نه چندان دور شاهد جایگزینی سلول‌های خورشیدی رایج امروزی با سلول خورشیدی رکتنی باشیم.

***

مراجع:

[1] Z. Zhu, S. Joshi, B. Pelz and G. Moddel, “Overview of optical rectennas for solar energy harvesting,” SPIE Proceedings: Next Generation (Nano) Photonic and Cell Technologies for Solar Energy Conversion IV, vol. 8824, pp. 1-11, 2013.

[2]A. M. A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis and B. S. Sharif, “Infra-red nanoantennas for solar energy collection,” Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC), pp. 1-4, 14-15 Nov. 2011.

[3] Z. Ma and A. Vandenbosch, “Optimal solar energy harvesting efficiency of nano-rectenna systems”, SolarEnergy, vol. 88, pp. 163-174, 2013.

[4] P. Biagioni, JS. Huang, and B. Hecht, “ Nanoantennas for visible and infrared radiation”, Rep Prog Phys, 75(2012), pp. 24-40.

[5] A. M. A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis and B. S. Sharif, “Analysis and modeling of infra-red solar rectennas,”IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 19, no. 3, 2013.

[6] G. Moddel and S. Grover, Rectenna Solar Cells, New York: Springer, 2013, pp. 231-257