بررسی میزان جمع‌آوری انرژی خورشیدی نانوآنتن‌های مارپیچی

وحید خوشدل؛ مهرداد شکوه صارمی
دانشگاه فردوسی مشهد
مشهد، ایران
v.khoshdel3380@gmail.com
m_saremi@um.ac.ir

چکیده — طی سالیان اخیر اقدامات جدی برای جایگزینی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک با نانوآنتن‌های نوری برای غلبه بر معایب سلول‌های خورشیدی فعلی صورت گرفته است. ایده جمع‌آوری انرژی خورشیدی با استفاده از نانوآنتن‌ها بر این اساس است که هنگامی که 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. در این مقاله ما به طراحی سه نانوآنتن مارپیچی مختلف پرداخته و عملکرد هریک را در جذب انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به نتایج به دست آمده، میدان الکتریکی به وجود آمده در محل نانوآنتن مارپیچی لگاریتمی از همه بزرگتر است.

واژه‌های کلیدی — رکتن؛ میدان الکتریکی؛ نانوآنتن مارپیچی؛ یکسوساز؛

۱. مقدمه

انرژی خورشیدی که بزرگترین منبع انرژی می‌باشد، پس از عبور از جو به سطح زمین می‌رسد. چگالی توان تشعشعی تابش خورشیدی که وارد جو زمین می‌شود تقریبا برابر ۱۳۷۰ وات بر هر متر مربع می‌باشد. 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 کره زمین جذب و به گرما تبدیل می‌شود. نور تابشی توسط خورشید دارای طیف فرکانسی بسیار وسیع می‌باشد که به سه باند فروسرخ (فرکانس‌های بین ۰/۳ تا ۴۲۸ تراهرتز)، مرئی (فرکانس‌های بین ۴۲۸ تا ۷۵۰ تراهرتز) و فرابنفش (فرکانس‌های بیش از ۷۵۰ تراهرتز) تقسیم‌بندی می‌شود. سلول خورشیدی یک قطعه الکترونیکی حالت جامد است که انرژی نور خورشید را مستقیماً توسط اثر فوتوولتاییک به الکتریسیته تبدیل می‌کند. سلول‌های خورشیدی ساخته شده از ویفر سیلیکون، کاربرد بسیاری دارند. سلول‌های خورشیدی از نیمه هادی‌ها ساخته شده و با اتصال سیلیکون‌های نوع n و p شکل می‌گیرند. بازدهی سلول‌های خورشیدی در بهترین حالت از ۳۰ درصد فراتر تمی‌رود به همین دلیل صنعت فتوولتاییک در حوزه تجاری نیاز به تکنولوژی‌های 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 آنتن است که تشکیل دهنده یک مجموعه به نام رکتن می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد، بهره سلول‌های خورشیدی معمولی در بهترین حالت حدود ۳۰ درصد است در حالی که با استفاده از این نانوآنتن‌ها در جهت گردآوری انرژی خورشیدی در حالت تئوری بهره‌ای تا ۱۰۰ درصد قابل دسترسی‌است[1]. استفاده از آنتن‌های نوری برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی از آنجایی که ارائه دهنده یک راه حل عملی و با بهره بالا به نسبت سایر فناوری‌های فتوولتاییک رایج مثل پنل‌های خورشیدی است، منجر به توسعه سریعی در صنعت نانو و ادوات نوری گشته است. آنتن‌های نوری یا همان نانوآنتن‌ها کاربردهای زیادی در ناحیه فرکانسی مرئی و فروسرخ دارند و قابلیت برهم کنش بالا با امواج نوری را فراهم می‌سازند.

www.SID.ir

Archive of SID

آنتن نوری ایده‌ای نوظهور در فیزیک نوری است. مشابه آنچه درآنتن‌های رادیویی و مایکروویوی وجود دارد هدف در آنتن‌های نوری تبدیل انرژی تشعشع فضای آزاد به یک انرژی محلی شده و برعکس است[2]. آنتن نوری شباهت زیادی با همتای رادیویی خود دارد، اما در کنار 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. در سلول‌های خورشیدی معمولی هر فوتون موجب تولید جفت الکترون‌ها و حفره‌هایی می‌شود که این جفت الکترون‌ها و حفره‌ها موجب تولید توان الکتریکی می‌شوند. حالا آنتنی را تصور کنید که توانایی جمع‌آوری تابش خورشیدی را داشته و آن را به سمت یک دیود که وظیفه یکسوسازی آن جریان را دارد هدایت کرده و در نتیجه توان الکتریکی تولید می‌کند. فناوری سلول‌های خورشیدی معمولی بر اساس نظریه فوتونی انیشتین از تابش موج الکترومغناطیسی است، در صورتی که رکتن بر اساس نظریه موجی ماکسول از موج الکترومغناطیس می‌باشد.

ایده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته اولین بار در سال ۱۹۷۲ مطرح گردید. 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 به عنوان جایگزینی برای پنل‌های فتوولتاییکی فعلی جهت تولید الکتریسیته پیشنهاد شده‌است. با توجه به ویژگی پهن باند بودن نانوآنتن‌های مارپیچی این نانوآنتن‌ها گزینه مناسبی جهت جمع‌آوری انرژی خورشیدی به نظر می‌رسند. در این مقاله ما به معرفی و طراحی سه نانوآنتن مختلف مارپیچی جهت استفاده در قسمت آنتنی سیستم رکتن خورشیدی پرداخته و عملکرد هر یک را در جمع‌آوری انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲. اصول سیستم رکتن خورشیدی

با در نظر گرفتن نور خورشید به عنوان یک موج الکترومغناطیسی طبق نظریه ماکسول، هنگامی که نور خورشید به نانوآنتن برخورد می‌کند با تحریک جریان AC بر روی سطح نانوآنتن یک میدان الکتریکی در محل شکاف آنتن ایجاد می‌شود.این میدان الکتریکی بزرگ که در محل شکاف نانوآنتن ایجاد شده است توسط یک یکسوساز مناسب می‌تواند به توان DC تبدیل گردد. هنگامی که یک میدان الکتریکی تابشی E^i به سطح آنتن برخورد می‌کند، کل میدان الکتریکی مماسی E^t طبق [1] برابر است با:

$$E^t=E^i+E^s \qquad (۱)$$

که در این رابطه E^s میدان الکتریکی پراکنده شده می‌باشد. بر اساس قانون شرایط مرزی، میدان الکتریکی مماسی روی سطح آنتن صفر است، یعنی $E^t=0$. اما این قاعده برای آنتن‌های معمولی که در فرکانس‌های رادیویی و مایکروویوی کار می‌کنند برقرار است چرا که فلزات رساناهای کاملی در نظر گرفته می شوند و لذا $E^s=-E^i$. این قاعده برای آنتن‌های نوری که در فرکانس‌های نوری و فروسرخ کار می‌کنند، به دلیل 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[1]. به همین خاطر می‌توان به جای جمله E^t در (۱) از ضرب امپدانس سطح در جریان سطح برای آنتنی روی محور z استفاده کرد. گذردهی الکتریکی نوری فلزات در این حالت مشابه سیستم‌های رادیویی و مایکروویوی نبوده و طبق مدل درود (Drude model) به صورت زیر بیان می‌گردد:

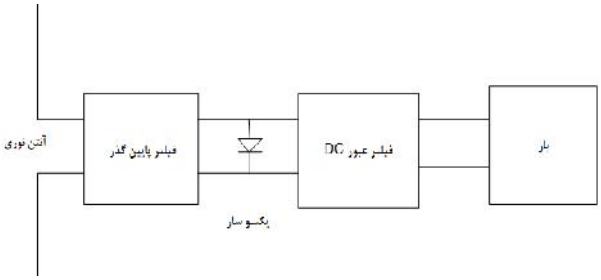
$$\varepsilon_r=\varepsilon_\infty-f_p^2/(f^2+jf_p\Gamma) \qquad (۲)$$

طبق (۲)، ε_∞ بیانگر ثابت دی‌الکتریک در فرکانس‌های بینهایت، f_p فرکانس پلاسما و Γ فرکانس میرایی است. ثابت دی‌الکتریک ε_r وابسته به فرکانس می باشد. مقادیر f_p و Γ برای نانوآنتنی از جنس نقره طبق [3] به ترتیب برابر با ۱۳۶۵۹ و ۴/۳۵ تراهرتز هستند. مقدار ε_∞ نیز برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

بلوک دیاگرام یک سیستم رکتن در *«شکل ۱»* به نمایش در آمده است. در اینجا آنتن نوری مسئول دریافت موج الکترومغناطیسی در یک ناحیه مشخص شده و تحویل آن به یک فیلتر پایین‌گذر است. کار فیلتر پایین‌گذر جلوگیری از تابش مجدد هارمونیک‌های بالاتر تولیدی طی فرآیند یکسوسازی توسط دیود غیرخطی می‌باشد، بدیهی است که تابش‌های مجدد منجر به اتلاف توان می‌شوند. از مهمترین یکسوکننده‌های مورد استفاده در سیستم رکتن خورشیدی دیود MIM (Metal–Insulator–Metal) است، این دیود که یک قطعه فیلم نازک متشکل از یک لایه عایقی با ضخامت چند نانومتر که بین دو الکترود فلزی پیچیده شده است، می‌باشد. جهت تطبیق امپدانسی و در نتیجه افزایش بهره سیستم، مقاومت آنتن نزدیک به مقاومت دیود در نظر گرفته می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: بلوک دیاگرام یک سیستم رکتن خورشیدی

۳. مزایا و برتری سیستم رکتن خورشیدی

مهمترین مزیت و برتری فناوری سیستم رکتن خورشیدی به نسبت فناوری‌های امروزی بهره‌وری بالاتر آن می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد بهره‌وری یک سلول خورشیدی رکتنی به صورت تئوری تا ۱۰۰ درصد قابل دسترسی است در حالی که این بهره‌وری برای فناوری‌های امروزی از ۳۰ درصد فراتر نمی‌رود.

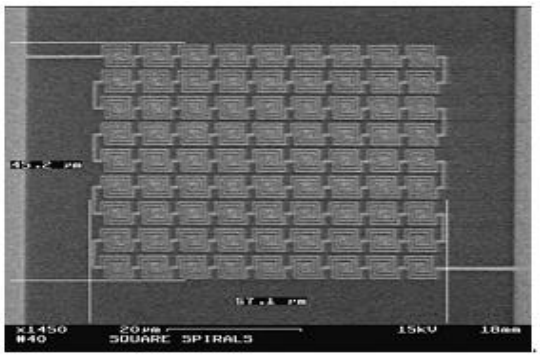
از آنجایی که نانوآنتن‌ها توانایی جذب زاویه‌ای وسیعی دارند به سیستم ردیاب خورشیدی جهت تعقیب کردن مسیر خورشیدی نیازی ندارند به همین دلیل حتی در صورت تابش مایل خورشیدی به سطح صفحه خورشیدی میزان بهره‌وری آنها تا حد قابل توجهی حفظ می‌شود. این سیستم همچنین می‌تواند انرژی تابیده شده از طرف زمین یا همان تشعشعات زمینی که ناشی از تابش‌های روزانه خورشید به سطح زمین هستند و در طول‌موج‌های ۱۰ میکرومتر یا در فرکانس‌های ۳۰ تراهرتز رخ می‌دهند را جذب کند. نانوآنتن‌های سیستم رکتن خورشیدی با جمع‌آوری این تشعشعات در طی شب هم می‌تواند به تولید انرژی الکتریکی بپردازد[4].

۴. محدودیت‌های سیستم رکتن خورشیدی

یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی سیستم رکتن خورشیدی امکان ساخت آنتن‌های با ابعاد نانومتر است. جهت ساخت این نانوآنتن‌ها امروزه از روش طرح‌نگارالکترونی (electron-beam lithography) استفاده می‌شود. در حال حاضر، طرح نگاری الکترونی به همراه پلیمرهای واسط مخصوص و فرایندهای شیمیایی مربوطه می‌تواند طرح‌های کمتر از ۱۰ نانومتر ایجاد کند.

عامل محدود کننده‌ای که باعث شده‌است امروزه سیستم رکتن خورشیدی همچنان در مرحله تحقیقاتی و آزمایشگاهی خود باقی بماند و به حوزه تجاری سازی وارد نشود، قسمت یکسوساز این سیستم می‌باشد. دیود MIM هرچند توانایی یکسوسازی فرکانس‌های تراهرتزی را دارد اما برای ناحیه فرکانسی بیش از ۳۰ تراهرتز توانایی پاسخگویی مناسبی را نداشته و فقط می‌تواند سیگنال‌های کمتر از ۳۰ تراهرتز را تبدیل به DC کند.

«*شکل ۲*» یک آرایه نانوآنتنی مارپیچی مربعی که بر روی یک صفحه از جنس طلا ساخته‌شده‌است را نشان می‌دهد.



شکل ۲: یک آرایه نانوآنتنی مارپیچی در یک سلول خورشیدی رکتنی[5].

۵. نانوآنتن‌های مارپیچی

آنتن‌های مارپیچی جزو دسته آنتن‌های مستقل از فرکانس هستند و توانایی عملکرد در یک باند وسیع فرکانسی را دارند. پلاریزاسیون، الگوی تشعشع و امپدانس این آنتن‌ها در یک پهنا باند وسیعی بدون تغییر باقی می‌ماند. در این قسمت ما قصد بررسی سه نانوآنتن مارپیچی شامل مربعی، دایروی و لگاریتمی(Logarithmic) جهت استفاده در قسمت آنتنی سیستم رکتن خورشیدی را داریم.

راندمان کل یک سیستم رکتن خورشیدی شامل دو قسمت اصلی می‌باشد: قسمت اول شامل راندمانی است که نور توسط نانوآنتن جذب و دریافت می‌شود و قسمت دوم شامل راندمانی است که نور جمع‌آوری شده توسط یکسوساز به توان DC تبدیل می‌گردد. در این مقاله ما به راندمان کاری قسمت اول پرداخته و بهترین ساختار آنتنی جهت استفاده در سیستم رکتن خورشیدی را پیشنهاد می‌کنیم. بهینه سازی های صورت گرفته شامل ابعاد آنتن، ابعاد و جنس زیرلایه‌ها می‌باشد شبیه سازی‌های صورت گرفته با

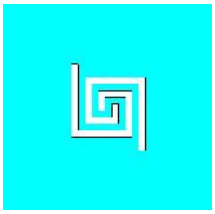
www.SID.ir

Archive of SID

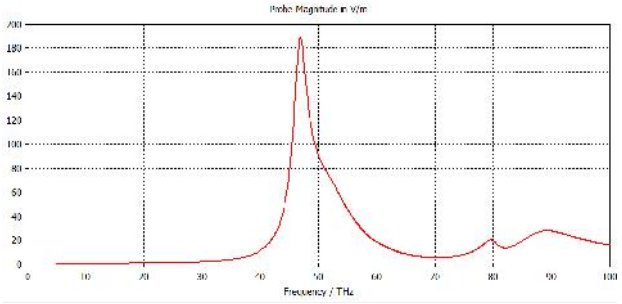
استفاده از شبیه ساز الکترومغناطیسی CST microwave studio انجام شده است، این نرم افزار با استفاده از تحلیل زمانی به تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی می‌پردازد. ثابت دی الکتریک فلز نقره طبق مدل درود به فرم حالت وابسته به فرکانس در نظر گرفته شده شده است. تحریک ساختارهای آنتنی با استفاده از یک موج تخت با پلاریزاسیون خطی عمود بر محور آنتن با دامنه یک ولت بر متر انجام شده است. با توجه به شبیه سازی‌ها و طراحی‌های انجام شده زیرلایه‌ای از جنس شیشه با ضخامت ۱۳۰۰ نانومتر و ابعاد ۱۶۰۰×۱۶۰۰ نانومتر که بروی یک صفحه زمین قرار دارد، جهت حداکثر راندمان کاری و جمع‌آوری انرژی خورشیدی پیشنهاد شده است.

۵.۱. نانوآنتن مارپیچی مربعی

نانوآنتن مارپیچی مربعی طراحی شده از جنس نقره طبق «شکل ۳» شامل ۵ بازو به عرض ۲۰ نانومتر و ضخامت ۵۰ نانومتر است. بزرگترین بازو این نانوآنتن طولی به اندازه ۵۰۰ نانومتر دارد. طبق نمودار «شکل ۴» این نانوآنتن در فرکانس ۴۷ تراهرتز(طول‌موج ۶۳۸۳ نانومتر) به میزان ۱۸۸ V/m در محل شکاف آنتنی آن میدان الکتریکی حاصل شده‌است.



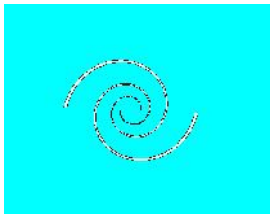
شکل ۳: نانوآنتن مارپیچی مربعی با زیر لایه شیشه‌ای



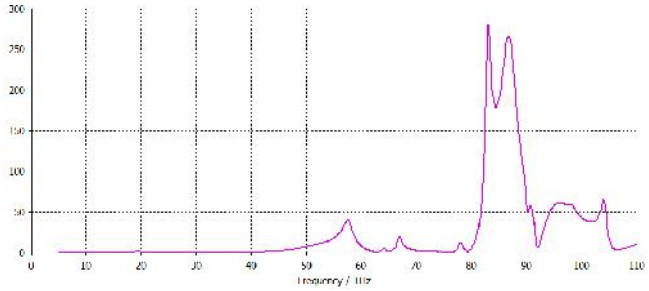
شکل ۴: تغییرات میدان الکتریکی بر حسب فرکانس برای نانوآنتن مارپیچی مربعی

۵.۲. نانوآنتن مارپیچی دایروی

نانوآنتن دایروی با شعاع حداکثر ۲۵۰ نانومتر و ضخامت ۵۰ نانومتر که شامل سه دور می‌باشد طبق «شکل ۵» نشان داده شده‌است، «شکل ۶» هم تغییرات میدان الکتریکی بر حسب فرکانس را برای این نانوآنتن نشان می‌دهد، طبق این نمودار حداکثر میدان الکتریکی دریافتی در محل شکاف این نانوآنتن در فرکانس ۸۳ تراهرتز (طول‌موج ۳۶۱۴ نانومتر) برابر ۲۸۰V/m می‌باشد.



شکل ۵: نانوآنتن مارپیچی دایروی با زیر لایه شیشه‌ای



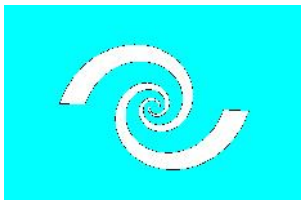
شکل ۶: تغییرات میدان الکتریکی بر حسب فرکانس برای نانوآنتن مارپیچی دایروی

۵.۳. نانوآنتن مارپیچی لگاریتمی

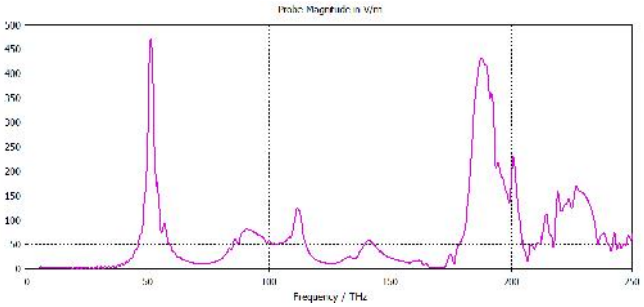
نانوآنتن طراحی شده طبق «شکل ۷» با شعاع حداکثر ۲۵۰ نانومتر و ضخامت ۵۰ نانومتر نشان داده شده‌است، نمودار «شکل۸» هم بیانگر تغییرات میدان الکتریکی این نانوآنتن تا بازه فرکانسی ۲۵۰ تراهرتز است. طبق این نمودار این نانوآنتن در فرکانس ۵۲ تراهرتز (طول‌موج ۵۷۶۹ نانومتر) به میزان ۴۶۵ V/m در محل شکاف آنتنی آن میدان الکتریکی ایجاد شده‌است هرچند در فرکانس ۱۸۰ تراهرتز (طول‌موج ۱۶۶۷ نانومتر) هم میدان الکتریکی‌ای به بزرگی ۴۳۰ V/m دریافت می‌کند که به نسبت دو نانوآنتن قبلی عملکرد بهتری در جذب انرژی خورشیدی از خود نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷: نانوآنتن مارپیچی لگاریتمی با زیر لایه شیشه‌ای



شکل ۸: تغییرات میدان الکتریکی بر حسب فرکانس برای نانوآنتن مارپیچی لگاریتمی

نتیجه‌گیری

با توجه به پیشرفت فناوری نانو در طی سال‌های اخیر و امکان ساخت نانوآنتن‌های نوری، سیستم رکتن خورشیدی به عنوان جایگزینی برای سلول‌های خورشیدی فعلی معرفی شده است. در این مقاله ما با معرفی سه نانوآنتن مارپیچی مربعی، دایروی و لگاریتمی از جنس نقره، به طراحی قسمت آنتنی سیستم رکتن خورشیدی پرداختیم و با توجه به زیر لایه شیشه‌ای طراحی شده برای این نانوآنتن‌ها به این نتیجه رسیدیم که در محل شکاف نانوآنتن لگاریتمی به نسبت ساختارهای دایروی و مربعی میدان الکتریکی بزرگتری جهت تبدیل به جریان الکتریکی ایجاد گردید به همین دلیل ساختار مناسبی برای استفاده در قسمت آنتنی سیستم رکتن خورشیدی می‌باشد.

منابع

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

[2] P. Bharadwaj, B.Deutsch, and L. Novotny, "Optical antennas," Advances in Optics and Photonics, Vol. 1, Issue 3, pp. 438-483, 2009.

[3] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. R. Bell, R. W. Alexander Jr., and C. A. Ward,"Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared," Appl.Opt. Vol.22, pp.1099- 1983.

[4] M. Bozzetti, G. de Candia, M. Gallo, O. Losito, L. Mescia, and F. Prudenzano, "Analysis and design of a solar rectenna," IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.2001-2004, 4-7 July 2010.

[5] M. Hanchate, S. Suryawanshi, K.Savalia, R. Patil and S. Srivastava ",Solar Nantenna," Elixir. Atharva College of Engineering, Mumbai University,pp.8378-8379,2012. Available: www.elixirpublishers.com.

www.SID.ir