افزایش بازتاب آینه های مورد استفاده در تکنولوژی نیروگاه های حرارتی خورشیدی با استفاده از لایه های دی الکتریک

ایران حسین زاده لیش؛ محمد رضا رشیدیان وزیری

پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران

چکیده

در این مقاله طراحی آینه های مورد استفاده در نیروگاه های حرارتی خورشیدی مورد بحث و بررسی قرار گرفت.دو نوع مختلف از این آینه ها شامل آینه های بازتابنده از سطح جلو و آینه های سطح ثانویه توسط نرم افزار MacLeod طراحی و خواص اپتیکی آنها مورد مطالعه قرار گرفت. برای افزایش میزان بازتاب از مواد دی الکتریک استفاده شد به طوری که لایه هایی از مواد با ضریب شکست بالا شامل Ta_2O_5، HfO_2 و ZrO_2 همراه با لایه ای با ضریب شکست کم شامل SiO_2 به لایه بازتابنده نقره اضافه گردید.مقایسه بین طراحی ها نشان می دهد که افزودن لایه های دی الکتریک باعث افزایش بازتاب آینه ها در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک تا حدود ۲٪ می شود که مقدار قابل توجهی برای این نوع آینه ها می باشد .

Enhancing the reflectivity of the mirrors used in solar thermal power plants by dielectric thin films

Hoseinzadeh Lish, Iran; Rashidian Vaziri, Mohammad reza

Laser and Optics Research School, NSTRI, Tehran

Abstract

In this paper, design of the used mirrors in solar thermal power plants is studied. Two different kinds of these mirrors, including the reflective mirrors from the front surface and the secondary surface reflective mirrors, are designed using the MacLeod software and their optical properties are investigated. In order to enhance the reflectivity, dielectric materials are used in design of the mirrors. Layers of high refractive index materials, like Ta_2O_5, HfO_2 and ZrO_2 in combination with a low refractive index layer of SiO_2 are added to a reflective layer of silver in our designs. Comparing the different designs revealed that addition of the dielectric layers enhances considerably the reflectivity of the mirrors in visible and near infrared regions up to 2% .

PACS No.77.55

مقدمه

در تکنولوژی توان تمرکز یافته خورشیدی (Concentrated Solar Power) یا CSP از آینه های بزرگی برای جمع آوری نور خورشید و تبدیل انرژی گرمایی به الکتریسیته استفاده می شود به طوری که این آینه ها مهم ترین قطعات در این تکنولوژی محسوب می شوند. از این آینه ها برای دوباره جهت دادن و یا متمرکز کردن نور خورشید استفاده می شود[۱]. آینه های مورد استفاده در این تکنولوژی باید از عملکرد اپتیکی بالایی از نظر بازتاب زاویه ای و شکل هندسی مناسب برخوردار باشند. همچنین باید طوری ساخته شوند که نیاز به مراقبت از آنها به حداقل برسد. بحث بعدی در این زمینه کاهش هزینه های ساخت این آینه ها می باشد و نکته آخر اینکه این آینه ها باید از طول عمر بالایی بدون افت عملکرد برخوردار باشند. دو طرح اصلی برای این آینه ها وجود دارد: طرح اول آینه های بازتابنده از سطح جلو (Front Surface Mirrors) می باشند که در آن ماده بازتابنده فلزی روی سطح جلویی زیرلایه قرار می گیرد. حالت دوم آینه های سطح ثانویه (Second Surface Mirrors) می باشند که ماده بازتابنده فلزی در پشت زیرلایه ای شفاف لایه نشانی می شود که در این

صورت به زیرلایه در اصل رولایه (Superstrate) گفته می شود [۱]. در انتخاب زیرلایه نوع اول خواص ساختاری آن منظور می شود در حالی که در نوع دوم تغییرات محیطی آن در نظر گرفته می شود [۳]. شدت نور خورشید از ناحیه ماورائ بنفش در ۳۰۰ نانومتر آغاز و در ناحیه مرئی به بیشترین مقدار خود می رسد و تا ناحیه مادون قرمز نزدیک در ۱۶۰۰ نانومتر از شدت خوبی برخوردارست[۲]. بنابراین برای استفاده بیشینه از نور خورشید باید از آینه هایی استفاده نمود که در این محدوده طول موجی بیشترین بازتاب را داشته باشند. از بین تمام فلزاتی که می توان برای آینه های خورشیدی از آنها استفاده نمود، نقره و آلومینیوم از بازتابی بالاتر از ٪۹۰ برخوردار هستند. بازتاب اکثر فلزات دیگر در ناحیه مرئی افت می کند و چون بیشترین شدت نور خورشید در ناحیه مرئی می باشد بنابراین این فلزات قابل استفاده نیستند.همچنین در آینه های آلومینیومی به علت جذب بین نواری که در ۸۰۰ نانومتر اتفاق می افتد شاهد کاهش بازتاب در این ناحیه هستیم[۷و۸].

با توجه به توضیحات بالا در طراحی های انجام شده در این مقاله از فلز نقره استفاده گردید.

طراحی آینه ها

در این مقاله نرم افزار Essential Macleod برای طراحی آینه های CSP به کار برده شد. طراحی شامل آینه های بازتابنده از سطح جلو و آینه های سطح ثانویه از فلز نقره می باشد. در تمام طراحی های انجام شده ضخامت فلز نقره ۱۰۰ نانومتر و ضخامت فلز مس ۵۰ نانومتر می باشد. همان طور که قبلاً گفته شد لایه مس برای محافظت از نقره در برابر تغییرات محیطی ضروری می باشد.

الف- آینه های بازتابنده از سطح جلو

در طراحی آینه های سطح جلو به علت اینکه عوامل تخریب کننده ای نظیر فرسایش، اکسیداسیون، خوردگی و گرد و خاک روی پایداری محیطی این آینه به شدت تاثیر می گذارند، بنابراین علاوه بر فلز مس به لایه محافظ روی فلز نقره نیاز است که در این مقاله از Al_2O_3 و SiO_2 استفاده شد. همچنین یک راه دیگر برای محافظت از نقره و همچنین بالا بردن میزان بازتاب آینه های فلزی استفاده از لایه های دی الکتریک است زیرا این لایه ها علاوه بر بالا بردن بازتاب در برابر خراشیدگی نیز مقاوم می باشند.

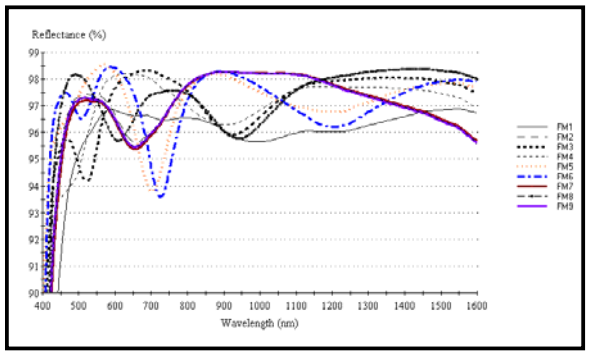
لایه ای فلزی با ضریب شکست n-ik را در نظر می گیریم.حال اگر دو لایه از مواد دی الکتریک را با ضرایب شکست n_1 و n_2 در نظر بگیریم که لایه ۲ در مجاورت فلز قرار داشته باشد بازتاب کل مجموعه به شکل رابطه زیر می شود [۴]:

$$R=\frac{1-\left[2(n_1/n_2)^2 n\right]\Big/\left[1+(n_1/n_2)^4(n^2+k^2)\right]}{1+\left[2(n_1/n_2)^2 n\right]\Big/\left[1+(n_1/n_2)^4(n^2+k^2)\right]}$$

اگر شرط $(n_1/n_2)^2>1$ برقرار باشد بازتاب به دست آمده از بازتاب خود فلز بیشتر خواهد بود. هر چه نسبت ضرایب شکست بزرگتر باشد افزایش بازتاب بیشتر خواهد بود اما باید به این نکته هم اشاره نمود که لایه های دی الکتریک در محدوده طول موجی خاصی باعث افزایش بازتاب می شوند که این محدوده بستگی به ضخامت آنها دارد. در میان مواد دی الکتریک برای لایه ۱ از موادی با ضریب شکست بالا نظیر Ta_2O_5(n=2.1)،(n=1.96) HfO_2 وZrO_2 (n=2.04) و برای لایه ۲ ازSiO_2 (n=1.46) به عنوان ماده ای با ضریب شکست پایین استفاده شد.این مواد از سختی بالایی برخوردارند.همچنین مقاومت خوبی در برابر فرسودگی، خوردگی و اکسیداسیون از خود نشان می دهند.

در طراحی اول ابتدا لایه ای به ضخامت ۵۰ نانومتر از مس (Cu) روی زیر لایه شیشه ای و سپس لایه نقره (Ag) به ضخامت ۱۰۰ نانومتر روی مس قرار می گیرند که این شالوده اصلی طراحی آینه های سطح جلو می باشد.همچنین لایه Al_2O_3(n=1.63) به عنوان لایه محافظ بالایی به ضخامت ۱۴۲ نانومتر در نظر گرفته می شود.طیف بازتاب این طراحی را در شکل ۱ ملاحظه می کنید (FM1).در این طراحی از طول موج ۵۰۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر بازتابی بیشتر از ٪۹۵ داریم ولی در محدوده ۴۰۰ تا ۴۴۰ نانومتر بازتاب زیر ٪۹۰ می باشد.اکنون برای بالا بردن میزان بازتاب از دو لایه دی الکتریک از مواد Ta_2O_5 و SiO_2 به ضخامت های ۵۴ و ۷۷ نانومتراستفاده می کنیم.همان طور که انتظار می رفت در ناحیه مرئی

شاهد افزایش بازتاب خواهیم بود به طوری که بازتاب از طول موج ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر به مقدار ٪۹۷/۴ می رسد و از ۸۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر هم بازتاب حدوداً بالای ٪۹۸ است(FM2). اکنون به عنوان طراحی سوم ضخامت لایه محافظ Al_2O_3 را به ۲۵۰ نانومتر افزایش می دهیم (FM3). شایان ذکر است که هر چه ضخامت لایه محافظ بیشتر باشد آینه طول عمر بیشتری خواهد داشت ولی ضخامت بیشتر روی بازتاب آینه اثر معکوس دارد و باعث کاهش بازتاب خواهد شد مگر اینکه به روش های معمول لایه نشانی نشود. (اخیرا برای لایه نشانی این ماده از روش Ion Layer Gas Reaction استفاده شده که افزایش ضخامت ماده تا یک میکرون هم خواص اپتیکی آینه را تغییر نمی دهد[۵]). در طراحی چهارم به جای لایه Al_2O_3 از لایه SiO_2 با همان ضخامت ۲۵۰ نانومتر استفاده می کنیم . مشاهده می شود که بازتاب از ناحیه ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر تضعیف می شود ولی در ادامه طیف تغییرات چندانی نداریم (FM4). در طراحی بعدی تعداد لایه های بازتابنده دی الکتریک را از ۲ به ۴ لایه افزایش می دهیم. با این کار بازتاب در ناحیه مرئی تا ۶۰۰ نانومتر از عملکرد بهتری نسبت به بقیه نمودارها برخوردارست ولی از ۶۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر با افت بازتاب تا ٪۹۴ مواجهیم. همچنین در محدوده ۱۲۰۰ نانومتر هم بازتاب تا ٪۹۶/۷۷ افت می کند(FM5).در ادامه تاثیر تعویض لایه محافظ را با SiO_2 بررسی می کنیم. مثل حالت قبلی بازتاب از محدوده ۶۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر کاهش می یابد، همچنین نسبت به حالت قبلی در ۵۰۰ نانومتر با کاهش بازتاب مواجهیم (FM6) علاوه بر ماده Ta_2O_5 می توان از مواد دیگری نظیر HfO_2 و ZrO_2 استفاده نمود.در طراحی بعدی به جای Ta_2O_5 از HfO_2 با ضخامت ۵۷ نانومتر استفاده نمودیم. نمودار این طراحی مشابه طراحی دوم خواهد بود یعنی FM2 و FM7 روی هم افتاده اند که این به علت نزدیکی ضرایب شکست این دو ماده دور از انتظار نیست. اکنون تعداد لایه های بازتابنده را از ۲ لایه به ۴ لایه افزایش می دهیم. در ناحیه ۱۲۰۰ نانومتر به بعد دارای بازتاب بالایی تا ٪۹۸/۴ می باشیم همچنین بیشترین بازتاب در ناحیه مرئی مربوط به طول موج ۵۰۰ با مقدار ٪۹۸/۱۵ می باشد(FM8).اگر ماده دی الکتریک را از HfO_2 به ZrO_2 هم تغییر دهیم باز با حالت قبلی تفاوتی نخواهد داشت .(FM9) که در شکل ۱ این عدم تغییر را ملاحظه می کنید.



شکل ۱ – تغییرات تعویض مواد و تعداد لایه های بازتابنده

مشخصات ۹ طراحی بالا را می توان در جدول ۱ خلاصه نمود.نتایج حاصل از این بخش را می توان به این صورت بیان کرد که هر چه تعداد لایه های بازتابنده بیشتر باشد نوسان طیف هم بیشتر خواهد بود ولی به میزان بازتاب بالاتری در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک (نانومتر ۱۶۰۰– ۱۲۰۰) دست خواهیم یافت. همچنین به علت اینکه ضرایب شکست مواد Ta_2O_5 ، HfO_2 و ZrO_2 به هم نزدیک می باشند فرق چندانی بین طیف های به دست آمده مشاهده نمی شود. بنابراین این مواد باید از نظر پایداری محیطی مورد مطالعه و آزمایش قرار بگیرند تا بتوان از زوج ماده ای با بیشترین پایداری محیطی در ساخت این آینه ها بهره جست.

جدول ۱– مشخصات طراحی های انجام شده برای آینه های بازتابنده از سطح جلو

شماره طراحی	تعداد لایه ها	لایه محافظ	تعداد لایه های بازتابنده	جنس لایه های بازتابنده
۱	۳	Al_2O_3(142 nm)	–	–
۲	۵	Al_2O_3(142 nm)	۲	Ta_2O_5/SiO_2
۳	۵	Al_2O_3(250 nm)	۲	Ta_2O_5/SiO_2
۴	۵	SiO_2(250 nm)	۲	Ta_2O_5/SiO_2
۵	۷	SiO_2(250 nm)	۴	Ta_2O_5/SiO_2
۶	۷	Al_2O_3(250 nm)	۴	Ta_2O_5/SiO_2
۷	۵	Al_2O_3(142 nm)	۲	HfO_2/SiO_2
۸	۷	Al_2O_3(142 nm)	۴	HfO_2/SiO_2
۹	۵	Al_2O_3(142 nm)	۲	ZrO_2/SiO_2

شکل ۲- طیف بازتاب آینه های سطح ثانویه

ب-آینه های سطح ثانویه

همان طور که در بخش های قبل توضیح داده شد در آینه های سطح ثانویه فلز نقره در پشت سطح شیشه ای قرار می گیرد و نور خورشید ابتدا به شیشه و سپس به فلز و سایر لایه ها برخورد می کند. در اینجا هم مانند بخش قبل از مواد بالا برنده بازتاب استفاده می گردد با این تفاوت که ترتیب قرار گیری لایه ها متفاوت است یعنی ابتدا جفت لایه های بالابرنده بازتاب لایه نشانی می شوند و سپس فلز نقره و مس روی آنها قرار می گیرند. بدین ترتیب در ابتدا نور به شیشه سپس به لایه های بازتابنده بالا و بعد از آن به فلز نقره برخورد خواهد کرد.در اینجا هم از مواد HfO_2 ، Ta_2O_5 ، SiO_2 و ZrO_2 استفاده گردید. ابتدا یک جفت لایه از مواد HfO_2 و SiO_2 و سپس دو لایه از این جفت ماده پشت شیشه قرار گرفت. همچنین این کار برای موادTa_2O_5 و SiO_2 و همچنین ZrO_2 و SiO_2 تکرار شد. نتیجه حاصله در شکل ۲ آمده است. مانند آینه های سطح جلو در اینجا هم با افزایش لایه های بازتابنده میزان بازتاب در آینه افزایش می یابد . ولی در کل بازتاب این نوع آینه ها در مقایسه با آینه های بازتاب جلو کمتر است به طوری که ماکزیمم بازتاب در بهترین حالت به ٪۹۷/۶ می رسد در حالیکه در آینه های بازتاب جلو بازتابی تا حد ٪۹۸/۴ داشتیم. از آنجایی که در این آینه ها در ابتدا نور به شیشه برخورد می کند علت این کاهش بازتاب، جذبی است که در شیشه به علت ترکیبات آهن موجود در آن اتفاق می افتد [۶].

شماره طراحی	تعداد لایه ها	تعداد لایه های بازتابنده	جنس لایه های بازتابنده
۱	۴	۲	HfO_2/SiO_2
۲	۶	۴	HfO_2/SiO_2
۳	۴	۲	Ta_2O_5/SiO_2
۴	۶	۴	Ta_2O_5/SiO_2
۵	۴	۲	ZrO_2/SiO_2
۶	۶	۴	ZrO_2/SiO_2

جدول ۲- مشخصات طراحی های انجام شده برای آینه های سطح ثانویه

نتیجه گیری

در این مقاله طراحی آینه های مورد استفاده در نیروگاه های حرارتی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت که شامل آینه های بازتابنده از سطح جلو و آینه های سطح ثانویه می باشند. برای بالابردن بازتاب این آینه ها از لایه های دی الکتریک که شامل مواد HfO_2 ، Ta_2O_5 ، SiO_2 و ZrO_2 بودند استفاده شد . نتایج نشان می دهند که استفاده از ۴ لایه از این مواد بازتابنده باعث بالابردن بازتاب در ناحیه مرئی طیف که بیشترین شدت نور خورشید در این ناحیه قرار دارد خواهد شد، بدون اینکه تضعیف بازتاب قابل توجهی روی بقیه طیف داشته باشد. همچنین بازتاب آینه های سطح ثانویه کمی کمتر از بازتاب آینه های بازتابنده از سطح جلو می باشد که این کاهش به دلیل جذبی است که در برخورد نور به شیشه اتفاق می افتد که با اصلاح ترکیبات موجود در مراحل ساخت شیشه و حذف ترکیبات جاذب نور قابل جبران می باشد.

مرجع ها

[1] S. Caron, “Accelerated aging of thick glass second surface silvered reflectors under sandstorm conditions,” Master Thesis, European Solar Engineering School, 2011.

[2] ASTM G173-03, Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation, American Society for Testing and Materials, 2003.

[3] C. E. Kennedy “Optical durability of candidate solar reflectors,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), ASME Transactions,vol 127,p262-269(2005).

[4] H. A. Macleod,”Thin Film Optical Filters”,CRC Press(2010).

[5] C. H. Fischer et al.,*Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 6, pp. 1518-1526, 2011.

[6] G. P. Butel et al, “Second Surface Silvered Glass Solar Mirrors of Very High Reflectance”,*Proc.SPIE*, 8108,pp 9(2011).

[7] Fend, T et al. ‘‘Comparative Assessment of Solar Concentrator Materials,’’ *Sol. Energy*, **74**, pp. 149–155(2003).

[8] Fend, T. et al.,‘‘Applicability of Highly Reflective Aluminum Coil for Solar Concentrators,’’ *Sol. Energy*, **68**, pp. 361–370(2000).

[9] Sinko, J., Private Communication, Wayne Pigment Corp., Milwaukee, WI,April 27, 2001.