طراحی و ساخت آیـنه تمام دی‌الکتریـک باند وسـیع در طیف مرئـی

سیدحسین کاظمی
عضو هیات علمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد
kazemi@iau-gonabad.ac.ir

چکیده

با روی هم قراردادن دو پشته ربع طول‌موج با طول موج‌های مرجع متفاوت، یک آینه‌ی تمام دی‌الکتریک باند وسیع برای طیف مرئی ساخته و برای هموار کردن طیف آینه از آلگوریتم گرادیان استفاده شده است. این آینه شامل ۳۹ لایه است که از لایه‌نشانی متناوب سولفید روی و کریولیت، با استفاده از تبخیر حرارتی در خلا روی زیر لایه‌ی شیشه بدست آمده است. طیف انعکاسی آینه اندازه‌گیری و نزدیک به حالت ایده‌ال بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: آینه‌های تمام دی‌الکتریک باند وسیع- آلگوریتم گرادیان -لایه‌نشانی-آینه‌های ربع طول موج

۱-مقدمه

استفاده از آینه‌های فلزی از دیر باز در کاربردهای گوناگون معمول بوده است: این آینه‌ها علاوه‌بر سادگی فرایند ساخت بسیار ارزان تمام می‌شوند. اما وجود ضریب جذب بالا در فلزات، دامنه‌ی این کاربرد ها را محدود نموده است. برای ساخت سیستم های دارای توان بالا مانند مولدهای لیزر مورد استفاده در مخابرات نوری [1] یا تداخل سنج هایی[۱] با نوارهای باریک می‌بایست از آینه‌های تمام دی‌الکتریک استفاده کرد. برای یک آینه‌ی سا خته شده از سولفید روی[۲] و کریولیت[۳] دسترسی به سطح جذب کمتر از ۰/۵٪ ساده است، هرچند با ایجاد شرایط مناسب، ضریب جذبی در حد ۰/۰۰۱٪ نیز گزارش شده است [1]. در این مقاله ابتدا به بررسی اجمالی آینه‌های تمام دی‌الکتریک پرداخته. سپس روش طراحی آینه‌ی باند وسیع، شرایط ساخت و نتایج اندازه‌گیری طیف انعکاسی بیان و در انتها جمع بندی شده است.

۲-آینه های تمام دی الکتریک

در آینه‌های تمام دی الکتریک، با لایه‌نشانی متناوب مواد با ضرایب شکست بالا (n_H) و پایین (n_L)، با ضخامت اپتیکی ربع طول‌موج می توان به حداکثر انعکاس دست یافت. علت این امر این است که اشعه‌های بازتابی از فصل مشترک‌های لایه‌ها وقتی به جلوی آینه می‌رسند همگی با فاز یکسان روی هم قرار می‌گیرند و بطور سازنده ترکیب می‌شوند. این آینه ها علیرغم حسنی که دارند، با دو مشکل روبرو هستند: جابجایی

---

[۱] Interferometer
[۲] ZnS
[۳] Cryolite

فاز در اشعه‌ی انعکاسی و محدود بودن پهنای باند انعکاس.

اگر آرایش لایه ها بگونه‌ای باشد که مواد با ضریب شکست بالا، لایه‌های بیرونی را تشکیل داده باشند، دراین حالت جابجایی فاز صفر خواهد شد و ادمیتانس اپتیکی به صورت

$$Y = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2p} \frac{n_H^2}{n_S} \qquad (1)$$

در خواهد آمد. در اینجا n_S ضریب شکست زیر لایه و $(2p+1)$ تعداد کل لایه‌هاست. انعکاس در فضای آزاد نیز بصورت

$$R = \left(\frac{1- Y}{1+ Y}\right)^2 \qquad (2)$$

در می‌آید.

هرچند این روابط نشان می‌دهند با اضافه کردن لایه‌ها ادمیتانس و در نتیجه انعکاس افزایش می‌یابد، اما در مورد پهنای باند ناحیه‌ی انعکاس اینگونه نیست. نشان داده شده است که پهنای نسبی ناحیه‌ی انعکاس طبق رابطه زیر به تعداد لایه بستگی ندارد [3].

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{4}{\pi} sin^{-1}\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right) \qquad (3)$$

در اینجا λ_0 طول موج مرجع و $\Delta\lambda$ پهنای ناحیه‌ی انعکاس می باشد.

۳-طراحی

اگر رابطه‌ی ۳ را در مورد آینه‌ی ساخته شده با n_H= ۲/۳ برای ZnS و n_L= ۱/۳۵ برای کریولیت بکار ببریم، پهنای نوار انعکاس برابر

$$\Delta\lambda = 0/335\lambda_o \qquad (4)$$

خواهد شد. این رابطه بیان می کند با افزایش طول موج، پیشروی در منطقه‌ی مادون قرمز، پهنای نوار انعکاس افزایش می یابد. در طیف مرئی (۴۰۰الی ۷۰۰nm نانومتر) با طول موج مرجع ۵۵۰nm پهنای نوار برابر ۱۸۴nm خواهد بود. روشن است که اگر آینه‌ای برای کل طیف مرئی (۳۰۰nm) مورد نیاز باشد، آینه‌ای با پهنای نوار۱۸۴nm کافی نخواهد بود.

پنسلین و استیودل با افزایش هارمونیکی ضخامت لایه‌ها اولین راه حل را ارائه دادند(سال۱۹۵۵). در ادامه هیونز و لیدل[1] [2] با افزایش حسابی یا هندسی ضخامتها روش مشابهی را تأسیس کردند. پس از ظهور کامپیوتر، الگوریتمهای مختلفی پیاده شد که لیدل [3] آنها را بررسی نموده است. استفاده از آلگوریتم گرادیان در این مورد تاکنون گزارش نشده است.

روشی که در اینجا استفاده شده است مبتنی بر روی هم قراردادن دو آینه‌ی باند محدود می باشد. یکی از این آینه‌ها ناحیه‌ی پایین و دیگری ناحیه‌ی بالای را منعکس می کند. طول موج های مرجع را به ترتیب برای اولی ۴۵۵nm و برای دومی ۶۰۵nm انتخاب کرده ایم. از آنجایی که مشکلات ساخت اجازه‌ی افزایش تعداد لایه‌ها را به ما نمی‌دهد لذا به تعداد حداقل آینه‌های باند محدود، بسنده کرده‌ایم. اگرچه افزایش تعداد این آینه‌ها بطور قطع بهتر است.

برای اینکه جفت آینه‌های باند باریک استفاده شده، انعکاسی برابر ۱۰۰٪ داشته باشند بایستی تعداد لایه‌هایشان بالای ۱۷ لایه انتخاب شوند. بنابراین ما این جفت آینه را ۱۹ لایه با آرایش $[H\ L]^9\ H$ انتخاب کردیم. یک لایه L ربع طول موج نیز بین آنها برای جلوگیری از حفره‌ی عبوری ناشی از اتصال دو لایه‌ی ربع طول موج H اضافه نمودیم. با بکارگیری رابطه‌ی۲ برای هر یک از این آینه‌ها انعکاس ۱۰۰٪ در طول موج مرجع هر یک تضمین می‌شود.

۳-۱ الگوریتم گرادیان

از آنجایی که ترکیب دو آینه‌ی نوار محدود در لبه‌ها و مرکز ناحیه‌ی انعکاس فیلتر نهایی حفره هایی ایجاد می‌کند برای تصحیح این اشکالات و هموار نمودن این ناحیه از الگوریتم بهینه سازی گرادیان استفاده شده است. در این الگوریتم ضخامت لایه‌ها بگونه‌ای تصحیح می‌شود که جذر میانگین مربعات خطای طیف آینه و طیف مطلوب حداقل گردد. در این الگوریتم, بهبود ضخامتها به صورت زیر انجام می‌پذیرد[2,4]:

$$\vec{d}^{(i+1)} = \vec{d}^{(i)} - s.\vec{\nabla} MF \qquad (5)$$

[1] Heavens & Liddell

در اینجا $\vec{d}^{(i)}$ و $\vec{d}^{(i+1)}$ بردارهایی شامل ضخامت لایه ها به ترتیب در مرحلهٔ i ام و $i+1$ ام هستند و s طول گام است. بردار گرادیان $\vec{\nabla} MF$ برابر است با

$$\vec{\nabla} MF = \{\partial MF/\partial d_1, \partial MF/\partial d_2, ..., \partial MF/\partial d_L\} \quad (۶)$$

است و تابع شایستگی MF به صورت

$$MF = \sqrt{\frac{1}{m}[\sum_{j=1}^{m}(R_j^D - R_j^C)^2]} \quad (۷)$$

در نظر گرفته شده است که در آن R_j^D و R_j^C به ترتیب نقطهٔ j ام طیف مطلوب و طیف محاسبه شده هستند. با مشتق‌گیری از این رابطه نسبت به d_k و با توجه به اینکه تنها متغیر وابسته به d_k , R_j^C است به رابطهٔ زیر خواهیم رسید.

$$\frac{\partial MF}{\partial d_k} = \frac{-1}{mMF}\sum_{j=1}^{m}[(R_j^D - R_j^C).\frac{\partial R_j^C}{\partial d_k}] \quad (۸)$$

که برای محاسبهٔ مشتق طیف نسبت به d_k از رابطهٔ زیر کمک می‌گیریم.

$$R = |r_{L+1,0}|^2 = r_{L+1,0}^* r_{L+1,0} \quad (۹)$$

که برای سادگی از اندیس‌های بالا و پایین صرف نظر نموده‌ایم. در اینجا

$$r_{k+1,0} = \frac{r_{k+1,k} + r_{k,0}e^{-2j\phi_k}}{1 + r_{k+1,k}r_{k,0}e^{-2j\phi_k}} \qquad k = 0, 1, ..., L \quad (۱۰)$$

است و $r_{k+1,k}$ برابر است با

$$r_{k+1,k} = \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} + n_k} \quad (۱۱)$$

فاز اپتیکی ϕ_k نیز برابر است با

$$\phi_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k d_k \quad (۱۲)$$

در ادامه $r_{k+1,0}$ که یک کمیت مختلط است را به صورت

$$r_{k+1,0} = A_{k+1} + jB_{k+1} \quad (۱۳)$$

در نظر می‌گیریم. در این صورت رابطهٔ (۹) به صورت

$$R = A_{L+1}^2 + B_{L+1}^2 \quad (۱۴)$$

در می آید و مشتق آن نسبت به d_k برابر با

$$\frac{\partial R}{\partial d_k} = 2(A_{L+1}\frac{\partial A_{L+1}}{\partial d_k} + B_{L+1}\frac{\partial B_{L+1}}{\partial d_k}) \quad (۱۵)$$

می شود. رابطهٔ (۱۳) نشان میدهد که تنها A_{k+1} و B_{k+1} توابعی از d_k هستند بنابراین $\frac{\partial A_{L+1}}{\partial d_k}$ به صورت زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial A_{L+1}}{\partial d_k} &= \frac{\partial A_{L+1}}{\partial A_L}\frac{\partial A_L}{\partial d_k} + \frac{\partial A_{L+1}}{\partial B_L}\frac{\partial B_L}{\partial d_k} \\
\frac{\partial A_L}{\partial d_k} &= \frac{\partial A_L}{\partial A_{L-1}}\frac{\partial A_{L-1}}{\partial d_k} + \frac{\partial A_L}{\partial B_{L-1}}\frac{\partial B_{L-1}}{\partial d_k} \\
&\vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \\
\frac{\partial A_{k+2}}{\partial d_k} &= \frac{\partial A_{k+2}}{\partial A_{k+1}}\frac{\partial A_{k+1}}{\partial d_k} + \frac{\partial A_{k+2}}{\partial B_{k+1}}\frac{\partial B_{k+1}}{\partial d_k} \\
\frac{\partial A_{k+1}}{\partial d_k} &= \frac{\partial A_{k+1}}{\partial \phi_k}\frac{\partial \phi_k}{\partial d_k} \\
\frac{\partial B_{k+1}}{\partial d_k} &= \frac{\partial B_{k+1}}{\partial \phi_k}\frac{\partial \phi_k}{\partial d_k}
\end{aligned} \quad (۱۶)$$

$\frac{\partial B_{L+1}}{\partial d_k}$ نیز به طور مشابه قابل بیان است.

٤-ساخت و اندازه‌گیری

با استفاده از دستگاه تبخیر حرارتی ادواردز مدل E306A و دستگاه ضخامت سنج بلور کوارتز مدل FTM4 (با دقت $0/5A^o$)، آینه را مورد بحث ساخته شد. فشار محفظه‌ی لایه نشانی برابر 10^{-6} میلی بار و لایه نشانی روی یک زیر لایه‌ی شیشه‌ای سرد انجام گرفت. پس از لایه نشانی بایستی آینه را از رطوبت دور نگه می‌داشتیم.

با قراردادن آینه در دستگاه طیف سنج نوری پرکین المر مدل LAMBDA9 تحت زاویه صفر نسبت به محور عمود بر آینه طیف عبوری آینه مطابق شکل ۱ بدست آمد.

برای بهبود پایداری این پوشش در مقابل رطوبت می‌توان از لایه‌ای از کریولت که پایداری بیشتری دارد، بعنوان لایه نهایی استفاده نمود. در اینجا ما از یک لایه ربع طول موج کریولیت استفاده کرده‌ایم. همچنین برای ایجاد چسبندگی بیشتر لایه ها و زیرلایه، قبل از شروع لایه نشانی آینه یک لایه‌ی ربع طول موج از کریولیت را روی زیرلایه قرار داده ایم. لازم به ذکر است، بطوری که بررسی تئوری نشان داده است، اضافه کردن این دو

لایه تأثیر محسوسی در دامنه طیف انعکاسی طراحی شده نداشته است و تنها باعث جابجایی اندکی در فاز امواج انعکاسی شده است.

جمع بندی

نتایج بدست آمده از ساخت آینه مذکور را می‌توان در چند مورد زیر خلاصه کرد:

الف) آینه ساخته شده دارای انعکاس بسیار بالا و گستردگی ناحیه انعکاس است و در تمام سطح زیر لایه یک نواخت می‌باشد و آین نشان می‌دهد استفاده از آلگوریتم گرادیان بسیار مفید بوده است.

ب) استفاده از ZnS بعنوان ماده با ضریب شکست بالا هرچند فرایند تبخیر را ساده می‌کند اما مسئله‌ی حفاظت آن در برابر رطوبت هوا اهمیت دارد. برای بهبود پایداری این پوشش در مقابل رطوبت می‌توان از لایه‌ای از کریولت که پایداری بیشتری دارد، بعنوان لایه نهایی استفاده نمود ویا بجای ZnS از مواد سخت‌تری مانند دی‌اکسید تیتانیوم، دی‌اکسید زیرکونیم ویا دی‌اکسید سرنیوم با ضریب شکست ۲/۲ استفاده نمود.

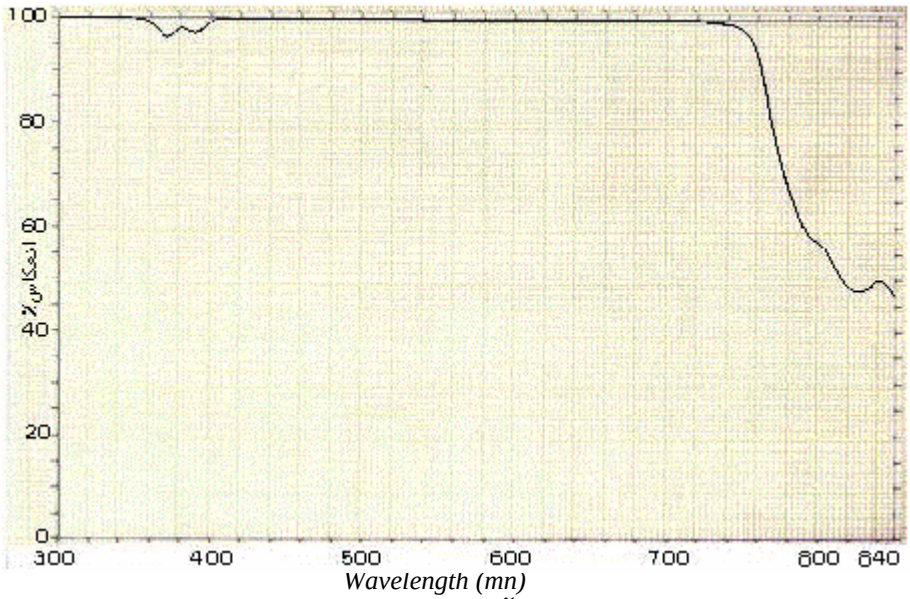
مراجع

[1] M. Bettiati, C. Starck, M. Pommies, N. Broqua, G. Gelly,M. Avella, J. Jiménez, I. Asaad, B. Orsal and J. M. Peransin,"*Gradual degradation in 980 nm InGaAs/AlGaAs pump lasers"* Science and Engineering B, Volumes 91-92, 30 April 2002, Pages 486-490

[2] H. A. Macleod, *Thin-film Optical Filters* , Adam Hilger Ltd, Bristol ,Third Edition 2001.

[3] H. M. Liddell, *Computer–aided techniques for the design of multilayer filters*, Adam Hilger LTD, 1981.

[4] J. H. Wang & P. K. Hopke ,"Equation-oriented system: an efficient programming approach to solve multilinear and polynomial equations by the conjugate gradient algorithm", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Volume 55, Issues 1-2, 13 January 2001, Pages 13-22.



شکل ۱ طیف انعکاسي آینه‌ي تمام دي‌الکتریك ساخته شده