

طراحی آینه‌ی نیم‌بازتابان در طول موج 10/6 میکرومتر با آستانه آسیب بالا

سارا ایزدی، حمیدرضا محمدی خشوئی، حمیدرضا فلاح، حسین زابلیان

دانشگاه اصفهان، گروه فیزیک

چکیده - بازتابنده‌های دی‌الکتریک چندلایه کاربردهای زیادی دارند که از آن جمله ساخت آینه‌های لیزری با ضریب بازتاب بالا در یک طول موج خاص می‌باشد. آینه‌های با آستانه آسیب بالا برای سامانه‌های لیزری پر قدرت ضروری هستند. بسته به وسایل نوری به کار رفته در این سامانه‌ها، نیاز است که پوشش نوری بهینه‌سازی شود و همچنین بایستی توزیع دامنه میدان الکتریکی در پوشش‌های تحت تابش لیزری مورد مطالعه قرار گیرد. در این مقاله سه روش برای طراحی آینه نیم‌بازتابان در طول موج 10/6 میکرومتر بیان می‌کنیم. با تجزیه و تحلیل نمودارهای هدایت ظاهری، توزیع میدان الکتریکی در لایه‌های فیلم نازک و بهبود مقاومت آسیب لیزری پوشش چندلایه با کاهش قله‌ی شدت میدان الکتریکی در لایه‌های بحرانی، نشان می‌دهیم که روش لایه‌نشانی با ضخامت چارک موج برای ساخت آینه‌های با آستانه آسیب بالا مناسب نیست و در ادامه ساختار بهینه‌ی لایه‌ها را بدست آوردیم.

کلید واژه - آستانه آسیب، ضخامت نوری چارک موج، لایه‌های نازک، میدان الکتریکی، هدایت ظاهری

Design of high damage threshold partial reflector mirror at 10.6 micron

S. Izadi, H. R. Mohammadi, H. R. Fallah, and H. Zabolian

Department of physics, Isfahan University

Abstract- Multilayer dielectric reflectors are widely used in applications such as laser mirrors which require especially high reflectance at a design wavelength. High damage threshold mirrors are necessary in high power laser systems. The optics of these systems raises the problem of optimization of the optical coating and, at the same time, the study of the distribution of the electric field amplitude of the radiation in the coating lasers. In this paper we describe three methods for design partial reflector mirror at 10.6 micron. By analyzing admittance loci, electric field distribution of multilayer thin films, and improving the laser damage resistance of multilayer coating by decreasing the peak intensity within the critical layers, we show that the quarter wave optical thickness method is not proper for high damage threshold mirrors and in the following we investigate the optimal structure of layers.

Keywords: damage threshold, quarter wave optical thickness, thin layers, electric field, admittance

۱- مقدمه

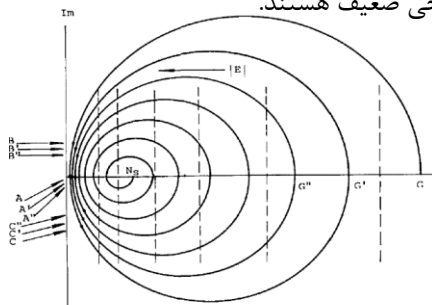
از این لیزر که در داخل کشور تولید نمی‌شود، آینه‌های آن است. همچنین در آزمایشگاه تحقیقاتی، لیزرهای گازکربنیک وجود دارند که آینه‌های آن‌ها صدمه دیده‌اند و بایستی تعویض شوند. ساختار این نوع از آینه‌ها یک ساختار چند لایه‌ای است که بسته به نوع و توان بازتاب مورد نظر تعداد، ضخامت و جنس

لیزرهای گازکربنیک از زمره‌ی پرکاربردترین لیزرهای قدرت بشمار می‌آیند [۱]. با توجه به ساختار این لیزر گازی امکان بومی‌سازی و ساخت این لیزر پرارزش در داخل کشور به طور کامل وجود دارد و اکنون تنها قسمتی

(۴) دایره‌هایی در امتداد محور موهومی را نشان می‌دهند [۵]. شدت خروجی از لایه از رابطه (۵) بدست می‌آید. با توجه به رابطه (۱) می‌توان رابطه‌ی (۶) را بیان کرد:

$$E \propto \frac{1}{\sqrt{\operatorname{Re}(\gamma)}} \quad (۶) \quad I = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(EH^*) \quad (۵)$$

طبق رابطه‌ی (۶) پربندهای دامنه میدان‌الکتریکی ثابت، خطوطی عمود بر محور حقیقی نمودار هدایت ظاهری است [۶]. شکل (۱) نمودار یک مجموعه لایه چارک‌موج را با بیشینه مقدار میدان‌الکتریکی در نقاط سطح مشترک A, A', A'' و ... را نشان می‌دهد که تحت تابش قوی، سطوحی ضعیف هستند.



شکل ۱: نمودار هدایت ظاهری یک مجموعه ۱۴ لایه‌ی چارک‌موج. خطوط خط‌چین بزرگی دامنه‌ی میدان‌الکتریکی را نشان می‌دهد [۴].

مقدار بیشینه هدایت ظاهری در سطوح مشترک باید کاهش یابد تا آستانه آسیب بالا رود. این کار را با دو روش می‌توان انجام داد. اگر ضخامت ماده‌های با ضریب شکست بالا و پایین به ترتیب، کوچکتر و بزرگتر از چارک موج $(d_H < \frac{\lambda}{4}, d_L > \frac{\lambda}{4})$ نقاط A, A', A'' ... به سمت B, B', B'' و... جابه‌جا می‌شوند و یا اگر ضخامت ماده‌های با ضریب شکست بالا و پایین به ترتیب، بزرگتر و کوچکتر از چارک موج $(d_H > \frac{\lambda}{4}, d_L < \frac{\lambda}{4})$ شود، نقاط A, A', A'' ... به سمت C, C', C'' و... جابه‌جا می‌شوند. نسبت میدان‌الکتریکی در دو طرف مرز بین لایه‌ها برابر است با [۷]:

$$\frac{E_j}{E_{j-1}} = \frac{1+r \exp(2i\varphi)}{(1+r) \exp(i\varphi)} \quad (۷)$$

که در این رابطه r ضریب بازتاب در ناحیه‌ی بین دو مرز j و $j-1$ است. φ ضخامت فازی لایه j ام با ضخامت فیزیکی d_j و ضریب شکست n_j است که برای فرود عمودی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\varphi_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda} \quad (۸)$$

اگر به سامانه‌ی چندلایه یک جفت لایه با مواد ضریب شکست بالا و پایین اضافه کنیم، با نوشتن شرط تساوی شدت میدان‌الکتریکی در مرزهای $j+1$ و $j-1$ و با استفاده از رابطه‌ی (۷) به رابطه‌ی زیر می‌رسیم:

لایه‌ها تعیین می‌شود. در برخی موارد توان بازتاب مورد نظر را می‌توان حتی با یک لایه حاصل نمود ولی این نوع از آینه‌ها آستانه‌ی آسیب پایینی دارند و برای لیزر پر قدرت گازکربنیک مناسب نیستند [۲]. در مرجع [۳] نشان داده شده است که لایه‌نشانی با لایه‌های با ضخامت یک‌چهارم طول موج روش مناسبی برای منظور بالا نیست بلکه میدان‌الکتریکی روی لایه‌ها می‌بایست کمینه شود، چرا که میدان‌های بزرگ می‌توانند به لایه‌ها آسیب برسانند [۴].

در این مقاله با سه روش، طراحی لایه‌های یک آینه نیم-بازتابان در طول موج $10/6$ میکرون را انجام می‌دهیم. با بررسی نمودارهای هدایت ظاهری و میدان‌الکتریکی لایه‌ها و در نظر گرفتن کم‌ترین میدان‌الکتریکی در لایه‌های بحرانی، نشان می‌دهیم که روش سوم بهترین طراحی را ارائه می‌دهد.

۲- زمینه نظری

با دانستن اندازه‌ی میدان‌الکتریکی فرودی و روش «مکان‌یابی هدایت ظاهری نوری» می‌توان توزیع میدان‌الکتریکی را روی لایه‌ها محاسبه کرد [۴-۶]. هدایت ظاهری، نسبت مقدار میدان مغناطیسی مماسی به مقدار میدان‌الکتریکی مماسی است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۴].

$$\gamma = \frac{H_a}{E_a} = \frac{C}{B} \quad (۱)$$

برای لایه‌ی q ام می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{B}{C} \right) = \left\{ \prod_{r=1}^q \begin{bmatrix} \cos \delta_r & \frac{i \sin \delta_r}{\eta_r} \\ i \eta_r \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{bmatrix} \right\} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_m \end{pmatrix} \quad (۲)$$

که در این رابطه، η_m هدایت ظاهری محیطی است که آینه در آن غوطه‌ور است، η_r هدایت ظاهری لایه‌ی r ام و δ_r تغییر فاز نسبی مربوط به لایه‌ی r ام می‌باشد. هدایت ظاهری یک لایه $(\gamma = x + iy)$ را می‌توان برحسب هدایت ظاهری لایه‌ی مجاور $(\gamma' = \alpha + i\beta)$ بازنویسی کرد. پس از محاسبات در نهایت به معادلات زیر می‌رسیم:

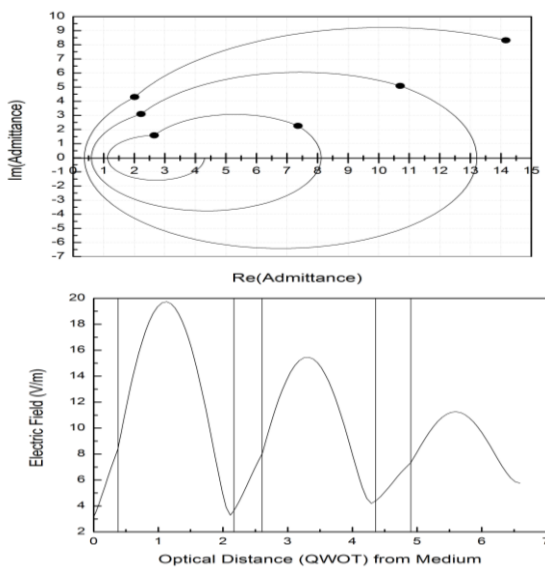
$$x^2 + y^2 - x \left[\frac{(\alpha^2 + \beta^2 + \eta_r^2)}{\alpha} \right] + \eta_r^2 = 0 \quad (۳)$$

$$x^2 + y^2 - y \left(\tan \delta_r - \frac{1}{\tan \delta_r} \right) - \eta_r^2 = 0 \quad (۴)$$

معادله (۳) دایره‌هایی در امتداد محور حقیقی و معادله

در نمودار هدایت ظاهری این طرح، تمام مرزها روی محور حقیقی قرار دارند. مرزهای نزدیک به مبدا، بسیار به هم نزدیک‌اند، به طوری که در شکل قابل تشخیص نیستند.

روش ۲- در این طراحی، ضخامت‌های ماده‌های با ضریب شکست بالا و پایین به ترتیب، کوچکتر و بزرگتر از چارک موج ($d_H < \frac{\lambda}{4}, d_L > \frac{\lambda}{4}$) است. همان‌طور که در شکل (۳) در نمودار بالا می‌بینیم، مرزهای نزدیک به مبدا به سمت راست و بالای نمودار جابه‌جا شده است که طبق معادله (۶) و نمودار میدان الکتریکی این طرح در پایین شکل (۳)، کاهش میدان در مرزهای حساس به وجود می‌آید.



شکل ۳: بالا، نمودار هدایت ظاهری طرح ۲. پایین، نمودار میدان الکتریکی طرح ۲.

روش ۳- در این طراحی، $d_H > \frac{\lambda}{4}$ و $d_L < \frac{\lambda}{4}$ است. طبق نمودار هدایت ظاهری در شکل (۴)، نقاط مرزی حساس در این طرح به سمت راست و پایین نمودار جابه‌جا شده‌اند که در نتیجه در این حالت نیز طبق نمودار پایین شکل (۴)، کاهش میدان در مرزهای حساس، حاصل می‌شود.

در جدول (۱) ضخامت‌های نوری این شش لایه در سه روش، برحسب چارک موج (QWOT) نسبت به محیط فرودی هوا بیان شده آمده است. مقدار جذب در لایه‌ها متناسب با عبارات nE_p^2 است که E_p بزرگترین مقدار میدان الکتریکی در قله و n ضریب شکست ماده است [۵]. برای مقایسه کردن طرح‌ها مقادیر nE_p^2 ، E_p ، بزرگترین میدان الکتریکی در مرز لایه E_{max} ، بازتاب (R) و ضخامت کل لایه‌ها در قسمت پایین جدول (۱) آمده است.

$$\left| \frac{1+r \exp(-2i\phi_L)}{(1+r) \exp(-i\phi_L)} \right|^2 = \left| \frac{(1-fr)+(r-f)\exp(2i\phi_H)}{(1-fr+r-f)\exp(i\phi_H)} \right|^2 \quad (9)$$

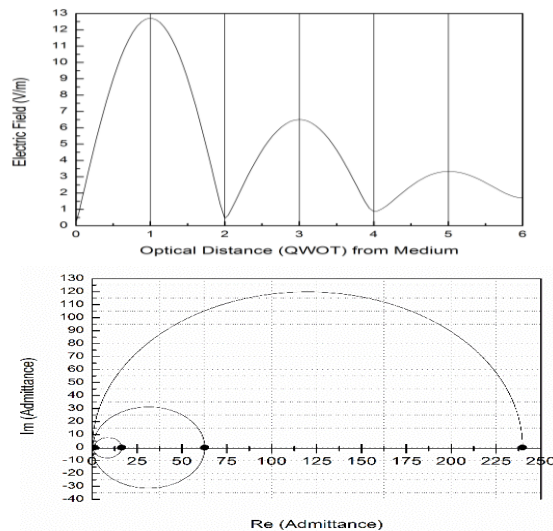
که در رابطه‌ی (۹) تابع f به صورت زیر تعریف شده است:

$$f = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (10)$$

ϕ_H و ϕ_L به ترتیب ضخامت‌های فازی لایه‌های اضافه شده با ضریب شکست پایین و بالا هستند. با استفاده از رابطه‌ی (۹) می‌توان ضخامت جفت لایه‌های جدید را محاسبه کرد.

۳- طراحی آینه نیم‌باز تابان

طراحی در نرم‌افزار Macleod برای فرود عمودی در طول موج ۱۰/۶ میکرون در محیط فرودی هوا انجام شده است. برای لایه‌های متناوب از ماده سولفید روی (ZnS) با ضریب شکست ۲/۲ و ژرمانیوم (Ge) با ضریب شکست ۴/۳ استفاده کردیم. در ابتدا برای بستره ژرمانیوم طراحی ضخامت‌های سه جفت از مواد لایه نشانی را به سه روش انجام دادیم. اطلاعات لازم را استخراج کرده و سپس با استفاده از آن‌ها و نرم‌افزار Origin نمودارها را رسم کردیم. از این به بعد طرح را به صورت $Ge/(ZnS, Ge)^3$ بیان می‌کنیم.



شکل ۴: بالا، نمودار هدایت ظاهری طرح ۱، نقاط دایره‌ای توپر مرزهای بین لایه‌ها را نشان می‌دهد. در پایین، نمودار میدان الکتریکی طرح ۱. خطوط عمودی مرز بین لایه‌ها را نشان می‌دهد.

روش ۱- در این طراحی تمام لایه‌ها با ضخامت چارک-موج هستند. در شکل (۲) نمودار بالا هدایت ظاهری و نمودار پایین میدان الکتریکی این طرح را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه‌ی میدان الکتریکی بر روی مرزها واقع است.

طرح $ZnSe/(ZnS,Ge)^3$ دیده می‌شود.

جدول ۲: ضخامت نوری لایه‌ها با بسترهای ZnS و ZnSe

| ضخامت نوری (QWOT) | | |
|----------------------------|---------------------------|------------|
| ZnSe/(ZnS,Ge) ³ | ZnS/(ZnS,Ge) ³ | شماره لایه |
| **** | **** | هوا |
| ۱/۴۴۸۳ | ۱/۶۲۵۸ | ۱ |
| ۰/۲۵۸۰ | ۰/۲۰۵۴ | ۲ |
| ۱/۴۳۲۶ | ۱/۵۶۸۰ | ۳ |
| ۰/۲۳۰۰ | ۰/۲۲۲۷ | ۴ |
| ۱/۴۷۷۶ | ۱/۴۷۷۹ | ۵ |
| ۰/۲۱۰۰ | ۰/۱۶۹۸ | ۶ |

جدول ۳: پارامترهای لازم برای مقایسه طرح‌های مختلف

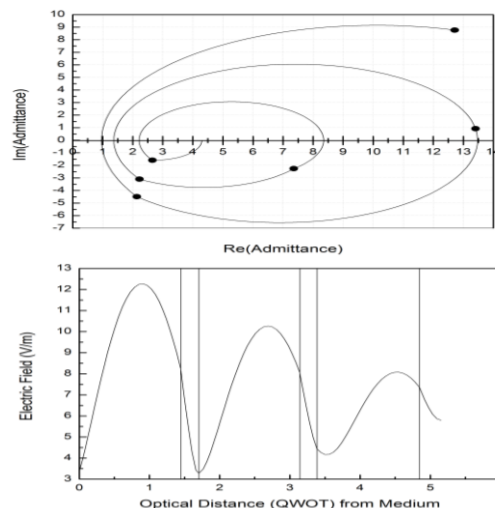
| Ge | ZnSe | ZnS | بستره |
|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| ۱۲/۲۶۹۵ | ۱۲/۱۸۱۳ | ۱۲/۵۹۹۴ | E_p (v/m) |
| ۶۴۷/۳۲۴۷ | ۶۳۸/۰۵۱۵ | ۶۸۲/۶۰۳۰ | nE_p^2 (v/m) |
| ۸/۲۲۵۳ | ۹/۱۶۵۶ | ۹/۸۰۱۶ | E_{max} (v/m) |
| ۸۰/۸۱۰۱ | ۸۲/۵۶۹۹ | ۸۱/۳۰۸۸ | R (%) |
| ۳۶۵۳/۵۹۰۰ | ۳۵۲۶/۸۲۰۰ | ۳۶۰۴/۱۹۰۰ | ضخامت کل (نانومتر) |

۴- نتیجه‌گیری

بیشترین کاهش میدان الکتریکی در لایه‌های آسیب‌پذیر در روش ۳ ($d_H > \frac{\lambda}{4}, d_L < \frac{\lambda}{4}$) مشاهده شد. همچنین در این روش، مقدار ضخامت کل لایه‌ها کم‌ترین مقدار است که منجر به هزینه و خطای کمتر در ساخت آینه می‌شود. با بررسی بستره‌های رایج در ساخت این نوع آینه‌ها و مقایسه پارامترهای لازم، ZnSe نسبت به Ge و ZnS بهترین بستره است.

مراجع

1. M. Endo, and R. F. Walter, *Gas lasers* (CRC Press, 2006).
2. Y. Ichikawa, K. Yoshida, Y. Tsunawaki, M. Yamanaka, T. Yamanaka, C. Yamanaka, H. Okamoto, N. Matsusue, and K. Kitajima, "Highly damage-resistant Mo mirror for high-power TEA CO₂ laser systems," *Applied optics* **26**, 3671-3675 (1987).
3. F. Demichelis, E. Mezzetti-Minetti, L. Tallone, and E. Tresso, "Optimization of optical parameters and electric field distribution in multilayers," *Applied optics* **23**, 165-171 (1984).
4. C.-C. Lee, and C.-W. Chu, "High power CO₂ laser mirror: a design," *Applied optics* **26**, 2544-2548 (1987).
5. H. A. Macleod, *Thin-film optical filters* (CRC Press, 2010).
6. D. Ristau, *Laser-Induced Damage in Optical Materials* (CRC Press, 2014).
7. P. H. Berning, "Theory and calculations of optical thin films," *Physics of thin films* **1**, 69-121 (1963).



شکل ۴: بالا، نمودار هدایت ظاهری طرح ۳. پایین، نمودار میدان الکتریکی طرح ۳.

جدول ۱: ضخامت نوری لایه‌ها و دیگر پارامترها در سه روش

| ضخامت نوری (QWOT) | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|
| شماره لایه | روش ۱ | روش ۲ | روش ۳ |
| هوا | **** | **** | **** |
| ۱ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۳۷۷۲ | ۱/۴۴۵۹ |
| ۲ | ۱/۰۰۰۰ | ۱/۷۹۱۴ | ۰/۲۵۶۳ |
| ۳ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۴۳۷۵ | ۱/۴۳۷۴ |
| ۴ | ۱/۰۰۰۰ | ۱/۷۵۴۲ | ۰/۲۴۵۸ |
| ۵ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۵۴۲۹ | ۱/۴۵۷۱ |
| ۶ | ۱/۰۰۰۰ | ۱/۶۸۹۵ | ۰/۳۱۰۴ |
| پارامترها | پارامترهای لازم برای مقایسه‌ی طرح‌ها | | |
| E_p (v/m) | ۱۲/۷۱۴۱ | ۱۹/۷۳۲۲ | ۱۲/۲۶۹۵ |
| nE_p^2 (v/m) | ۶۹۵/۰۸۷۹ | ۸۵۶/۵۹۱۴ | ۶۴۷/۳۲۴۷ |
| E_{max} (v/m) | ۱۲/۷۱۴۱ | ۸/۴۱۵۹ | ۸/۲۲۵۳ |
| R (%) | ۹۳/۳۴۵۴ | ۸۱/۰۵۸۷۵ | ۸۰/۸۱۰۱ |
| ضخامت کل (نانومتر) | ۵۴۶۲/۴۷۰۰ | ۷۱۴۲/۵۸۰۰ | ۳۶۵۳/۵۹۰۰ |

با توجه به هدف اصلی که کاهش میدان الکتریکی در مرزها و قله‌های داخل لایه‌ها و کاهش جذب درون لایه‌ها است، مشخص است که طرح شماره ۳ ($d_H > \frac{\lambda}{4}, d_L < \frac{\lambda}{4}$) بهترین طرح است. از طرفی ضخامت کل لایه‌ها در طرح ۳ کمترین مقدار را دارد. طرح نهایی را با زیرلایه‌های ZnS با ضریب شکست ۲/۲ و ZnSe با ضریب شکست ۲/۴ در تکرار کردیم. در جدول (۲) تغییر ضخامت لایه‌ها در طراحی‌های $ZnS/(ZnS,Ge)^3$ و $ZnSe/(ZnS,Ge)^3$ آمده است. در جدول (۳) اطلاعات لازم برای مقایسه‌ی طرح‌های با بستره‌های مختلف آمده است. بیشترین کاهش میدان الکتریکی در قله‌های داخل لایه‌ها، کم‌ترین مقدار nE_p^2 و ضخامت کل لایه‌ها و بیشترین مقدار بازتاب در