

طراحی آینه‌ی تمام‌باز تابان تمام‌دی‌الکتریک و فلز-دی‌الکتریک لیزر گاز کربنیک با آستانه آسیب بالا

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

دانشگاه اصفهان، گروه فیزیک

چکیده - سامانه‌های لیزری پر قدرت به آینه‌های با آستانه آسیب بالا نیاز دارند. پوشش‌های چند لایه‌ای که تحت تابش لیزری قوی قرار می‌گیرند، به دلیل جذب دچار آسیب می‌شوند. جذب تابش در هر نقطه به‌طور مستقیم، متناسب با شدت میدان الکتریکی در آن نقطه است. هدف این مقاله بهینه کردن پارامترهای نوری در سطوح مشترک لایه‌های فیلم نازک با استفاده از تحلیل روش مکان‌یابی هدایت ظاهری است. ما سه روش برای طراحی آینه تمام‌باز تابان بیان می‌کنیم. نشان می‌دهیم بیشترین کاهش میدان الکتریکی در لایه‌های آسیب‌پذیر در روش سوم که ضخامت‌های ماده با ضریب شکست بالا، بزرگتر از چارک‌موج و ضخامت‌های ماده با ضریب شکست پایین، کوچکتر از چارک‌موج است، مشاهده می‌شود و با استفاده از این روش، آینه‌های تمام‌دی‌الکتریک و فلز-دی‌الکتریک تمام‌باز تابان را طراحی می‌کنیم.

کلید واژه - آستانه آسیب، آینه تمام‌دی‌الکتریک، آینه فلز-دی‌الکتریک، لایه‌های نازک، میدان الکتریکی

Design of high damage threshold all-dielectric and metal-dielectric total reflector for CO₂ gas laser

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

Department of physics, Isfahan University

Abstract- High damage threshold mirrors are necessary in high power laser systems. The damage of absorbing multilayer coating by high intensity laser radiation is due to absorption. The absorption of radiation at any point is directly proportional to the electric field intensity at that point. The aim of this paper is optimize the optical parameters at layer's interfaces by using admittance locus analysis method. Among the various examined designs, the results show that the damage threshold could be enhanced by coating the high index layers with the thickness greater than $\frac{1}{4}$ wavelength and the low index layers with the thickness less than $\frac{1}{4}$ wavelength. By using this method, all-dielectric and metal-dielectric high-damage threshold total reflectors have designed.

Keywords: damage threshold, all-dielectric mirror, metal-dielectric mirror, thin layers, electric field

۱- مقدمه

آستانه آسیب سطح آن است [۱]. آینه‌های لیزری از قطعات اپتیکی با کاربرد فراوان در سامانه‌های لیزری به حساب می‌آیند. 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 گاز کربنیک مناسب نیستند [۲].

قطعات اپتیکی در اثر تابش لیزرهائی با انرژی و یا توان بالا دچار آسیب می‌شوند. در هر سطح انرژی لیزر، احتمال آسیب سطح یک قطعه نسبت به حجم آن بیشتر است. بنابراین عامل محدودکننده‌ی استفاده از یک قطعه اپتیکی

شدت میدان الکتریکی در مرزهای $z + 1$ و $z - 1$ و با استفاده از رابطه‌ی (۴) به رابطه‌ی زیر می‌رسیم:

$$\left| \frac{1+r \exp(-2i\phi_L)}{(1+r) \exp(-i\phi_L)} \right|^2 = \left| \frac{(1-fr)+(r-f) \exp(2i\phi_H)}{(1-fr+r-f) \exp(i\phi_H)} \right|^2 \quad (۶)$$

که در رابطه‌ی (۶) تابع f به صورت زیر تعریف شده است:

$$f = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (۷)$$

ϕ_H و ϕ_L به ترتیب ضخامت‌های فازی لایه‌های اضافه شده با ضریب شکست پایین و بالا هستند. با استفاده از رابطه‌ی (۶) می‌توان ضخامت جفت لایه‌های جدید را محاسبه کرد.

۳- روش‌های طراحی آینه

جنس لایه‌ها از مواد مرسوم که در ساخت قطعات نوری لیزر گاز کربنیک استفاده می‌شود و امکان دسترسی به آن‌ها برای ما وجود دارد، انتخاب شده است. طراحی در نرم افزار Macleod برای فرود عمودی، محیط فرودی هوا و لایه‌های متناوب سولفید روی (ZnS) با ضریب شکست $2/2$ و ژرمانیوم (Ge) با ضریب شکست $4/3$ انجام شده است. در ابتدا از سلنید روی (ZnSe) برای بستری استفاده کردیم. این طرح که به صورت $ZnSe/(ZnS, Ge)^5$ نشان داده می‌شود، برای پنج جفت به شکل چهار جفت چارک موج و تغییر ضخامت جفت نزدیک به محیط فرودی به سه روش متفاوت صورت گرفت. اطلاعات لازم را استخراج کرده و سپس با استفاده از آن‌ها و نرم‌افزار Origin نمودارها را رسم کردیم.

روش ۱- جفت نهایی را نیز چارک‌موج انتخاب کرده و بدین صورت ۱۰ لایه چارک‌موج حاصل شد. شکل (۱-الف) توزیع میدان الکتریکی بر روی لایه‌ها را در این روش نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه‌ی میدان الکتریکی بر روی مرزها واقع شده است. در نمودارهای شکل (۱)، خطوط عمودی مرز بین لایه‌ها را نشان می‌دهند.

روش ۲- در این طراحی برای آخرین جفت، ضخامت ماده با ضریب شکست بالا، کوچکتر از چارک موج ($d_H < \frac{\lambda}{4}$) و ضخامت ماده با ضریب شکست پایین، بزرگتر از چارک موج ($d_L > \frac{\lambda}{4}$) است. شکل (۱-ب) نمودار میدان الکتریکی این طرح را نشان می‌دهد. در این حالت

در مراجع [۳-۵] نشان داده شده است که لایه‌نشانی با لایه‌های با ضخامت یک‌چهارم طول موج روش مناسبی برای منظور بالا نیست بلکه میدان الکتریکی روی لایه‌ها می‌بایست کمینه شود. Gill و Newnam با تغییر دو لایه‌ی بیرونی در طراحی یک مجموعه‌ی استاندارد چارک‌موج نشان دادند که مقاومت در برابر آسیب تا ۴۰٪ افزایش یافت [۳].

در این مقاله با سه روش، طراحی لایه‌های یک آینه را انجام می‌دهیم. سپس با بررسی و استفاده از بهترین روش طراحی آینه تمام‌بازتابان تمام‌دی‌الکتریک و فلز-دی‌الکتریک انجام داده و با تغییر بستره و تعداد جفت‌های غیرچارک‌موج، سعی کرده‌ایم بهترین طراحی را انتخاب کنیم تا در آینده‌ی نزدیک به پیاده‌سازی آن بپردازیم.

۲- زمینه نظری

با دانستن اندازه‌ی میدان الکتریکی فرودی و روش «مکان‌یابی هدایت ظاهری نوری» می‌توان توزیع میدان الکتریکی را روی لایه‌ها محاسبه کرد [۶، ۷]. هدایت ظاهری، نسبت مقدارمیدان مغناطیسی مماسی به مقدار میدان الکتریکی مماسی است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۶].

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

شدت خروجی از لایه از رابطه (۲) بدست می‌آید و با توجه به رابطه (۱) می‌توان رابطه‌ی (۳) را بیان کرد [۸]:

$$E \propto \frac{1}{\sqrt{Re(\gamma)}} \quad (۳) \quad I = \frac{1}{2} Re(EH^*) \quad (۲)$$

نسبت میدان الکتریکی در دو طرف مرز بین لایه‌ها برابر است با [۹]:

$$\frac{E_j}{E_{j-1}} = \frac{1+r \exp(2i\phi)}{(1+r) \exp(i\phi)} \quad (۴)$$

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:

$$\phi_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda} \quad (۵)$$

اگر به سامانه‌ی چندلایه یک جفت لایه با مواد ضریب شکست بالا و پایین اضافه کنیم، با نوشتن شرط تساوی

شماره لایه	روش ۱	روش ۲	روش ۳
هوا	*****	*****	*****
۱	۱/۰۰۰۰	۰/۴۵۱۹	۱/۴۵۱۹
۲	۱/۰۰۰۰	۱/۶۵۸۱	۰/۳۴۱۹
۱ تا ۳	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰

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 [۷]. 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 جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: پارامترهای لازم برای مقایسه سه روش ۱، ۲ و ۳.

روش‌ها	روش ۱	روش ۲	روش ۳
E_p (v/m)	۱۲/۷۶۰۶	۱۹/۰۴۸۸	۱۲/۷۵۱۵
nE_p^2 (v/m)	۷۰۰/۱۷۷۱	۴۱۱/۱۲۰۰	۴۰۲/۳۱۵۲
E_{max} (v/m)	۱۲/۷۶۰۶	۹/۷۷۸۰	۹/۶۷۲۷
R (%)	۹۹/۷۹۵۶	۹۹/۵۴۱۶	۹۹/۵۵۱۳
ضخامت کل (نانومتر)	۱۲۰۰ ۹۱۰۴	۱۰۰۰ ۹۵۵۹	۹۱۰۰ ۸۵۸۹

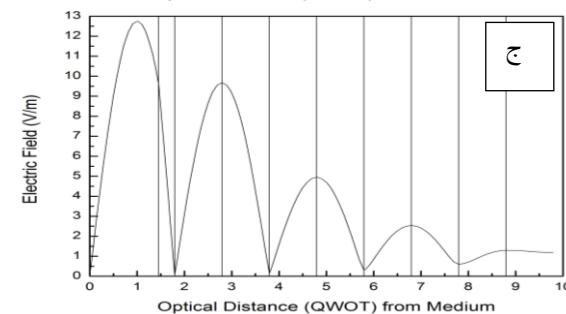
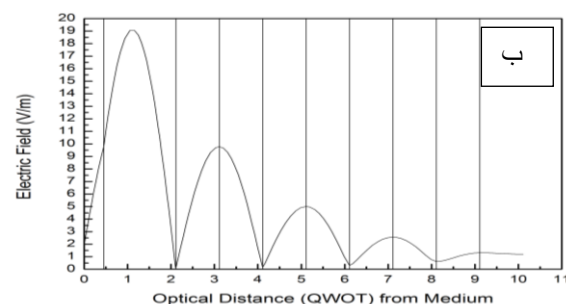
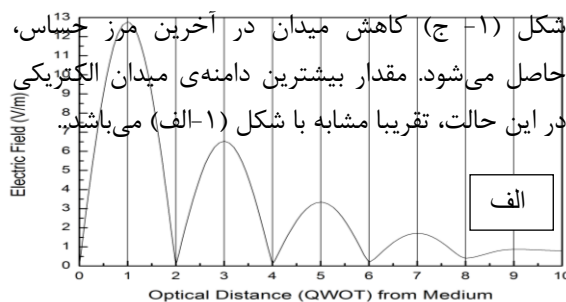
با توجه به هدف بهینه‌سازی که کاهش میدان الکتریکی در مرزها و قله‌های داخل لایه‌ها و کاهش جذب درون لایه‌ها است، مشخص است که طرح شماره ۳ ($d_H > \frac{\lambda}{4}, d_L < \frac{\lambda}{4}$)، بهترین طرح است و بالاترین آستانه آسیب را دارد. مورد مهم دیگر، ضخامت فیزیکی کل لایه‌ها است که هرچه کمتر باشد، هزینه و خطای کار آزمایشگاهی کمتر می‌شود که در این طرح ضخامت کل از دیگر موارد کمتر است. در طرح ۳ با اضافه کردن دو جفت غیرچارک‌موج دیگر که در حقیقت لایه‌های یک تا چهار طرح جدید هستند، تعداد لایه‌ها را به ۱۴ عدد افزایش دادیم. ضخامت‌های دو جفت اضافه شده و دیگر اطلاعات مربوط به طرح در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳: پارامترهای طرح $ZnSe/(ZnS,Ge)^7$

شماره لایه	ضخامت نوری (QWOT)	اطلاعات استخراج شده از طرح
هوا	*****	E_p (V/m)
۱	۱/۶۲۳۴	nE_p^2 (V/m)
۲	۰/۲۱۰۸	E_{max} (V/m)
۳	۱/۵۶۱۶	R (%)
۴	۰/۲۵۳۷	ضخامت کل

اگر چه بیشترین دامنه میدان الکتریکی افزایش پیدا کرده اما دامنه میدان در مرز حساس بین دو لایه‌ی آخرین جفت کاهش یافته است.

روش ۳ - در این روش برای جفت نزدیک به محیط فرودی، $d_H > \frac{\lambda}{4}$ و $d_L < \frac{\lambda}{4}$ است. در این حالت نیز طبق



شکل ۱: نمودار میدان الکتریکی الف: طرح ۱، ب: طرح ۲، ج: طرح ۳. خطوط عمودی مرز بین لایه‌ها را نشان می‌دهد.

در جدول (۱) ضخامت‌های نوری این شش لایه به سه روش بیان شده آمده است. ضخامت‌های نوری برحسب چارک موج ($QWOT^1$) نسبت به محیط فرودی هوا است.

جدول ۱: ضخامت نوری لایه‌ها در سه روش ۱، ۲ و ۳

ضخامت نوری ($QWOT$)	
-----------------------	--

¹ Quarter Wave Optical Thickness

کاهش یافته و از طرف دیگر مقدار بازتاب حاصل از مجموعه افزایش پیدا کرده است. با افزایش تعداد جفت لایه‌ها شدت هر کدام از تغییرات بیان شده، افزایش یافته است.

جدول ۶: پارامترهای مقایسه طرح‌ها در هر بار اضافه کردن جفت لایه‌ها

تعداد جفت لایه‌ها	یک	دو	سه	چهار
E_m (v/m)	۰/۷۳۰۳	۰/۶۰۳۰	۰/۵۲۴۲	۰/۴۶۹۵
E_p (v/m)	۱۲/۷۴۸۵	۱۲/۷۴۷۹	۱۲/۷۵۵۲	۱۲/۷۵۷۲
nE_p^2 (v/m)	۸۵۴۱ ۶۹۸	۷۹۰۱ ۶۹۸	۵۸۶۷ ۶۹۹	۸۰۸۸ ۶۹۹
E_{max} (v/m)	۱۰/۰۱۴۰	۸/۳۸۹۴	۷/۳۵۰۳	۶/۶۱۵۸
R (%)	۹۹/۱۱۶۲	۹۹/۳۹۷۴	۹۹/۵۴۴۶	۹۹/۶۳۴۸
A (%)	۰/۷۹۴۵	۰/۵۴۱۷	۰/۴۰۹۳	۰/۳۲۸۳
ضخامت کل (نانومتر)	۶۱۰۰ ۱۳۴۱	۶۵۰۰ ۲۶۰۹	۶۰۰۰ ۳۸۶۴	۷۱۰۰ ۵۱۱۱

۵- نتیجه‌گیری: بیشترین کاهش میدان الکتریکی در لایه‌های آسیب‌پذیر و کمترین مقدار ضخامت کل، در روش ۳ که ضخامت‌های ماده با ضریب شکست بالا و پایین به ترتیب، بزرگتر و کوچکتر از چارک‌موج است، مشاهده شد. در ادامه با این روش آینه تمام‌دی-الکترونیک و فلز-دی‌الکترونیک را طراحی کردیم. برای طراحی آینه فلز-دی‌الکترونیک با بررسی بستره‌های رایج در ساخت این نوع آینه‌ها و مقایسه پارامترهای لازم، مس به عنوان بهترین بستره انتخاب شد. با طراحی لایه نشانی و در حضور لایه‌ها در هر بار اضافه کردن جفت-لایه‌ی جدید، پارامترهای لازم برای پیاده‌سازی آینه بهبود یافت.

مراجع

1. I. Standard, "11254-2," "Determination of laser-damage threshold of optical surfaces. Part 2. S-on-1 test," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2001).
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. J. H. Apfel, "Optical coating design with reduced electric field intensity," *Applied optics* **16**, 1880-1885 (1977).
4. O. Arnon, and P. Baumeister, "Electric field distribution and the reduction of laser damage in multilayers," *Applied optics* **19**, 1853-1855 (1980).
5. 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).
6. C.-C. Lee, and C.-W. Chu, "High power CO₂ laser mirror: a design," *Applied optics* **26**, 2544-2548 (1987).
7. H. A. Macleod, *Thin-film optical filters* (CRC Press, 2010).
8. D. Ristau, *Laser-Induced Damage in Optical Materials* (CRC Press, 2014).
9. P. H. Berning, "Theory and calculations of optical thin films," *Physics of thin films* **1**, 69-121 (1963).

(نانومتر)	
-----------	--

۴- طراحی آینه تمام‌بازتابان فلز-دی‌الکترونیک

ابتدا طراحی لایه‌نشانی لایه‌ای طلا (Au) با ضخامت ۳۵ نانومتر بر روی زیرلایه‌های مختلف سلنیدروی (ZnSe)، سولفیدروی (ZnS)، ژرمانیوم (Ge) و مس (Cu) انجام شد. ضریب شکست مختلط مواد به شکل $n - ik$ نشان داده می‌شود. برای طراحی در طول‌موج ۱۰/۶۰ میکرون، ضریب شکست طلا و مس به ترتیب $54.70 - i0.16$ و $10.80 - i47.50$ است. در هر طراحی بزرگترین مقدار دامنه میدان در لایه‌ی فلزی (E_m)، بازتاب (R) و جذب (A) حاصل از کل مجموعه در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴: مقایسه‌ی طرح‌های مختلف

طرح	E_m (v/m)	R (%)	A (%)
ZnSe/Au	۱/۱۵۰۷	۹۷/۲۷۱۴	۲/۵۸۳۵
ZnS/Au	۱/۱۵۱۹	۹۷/۲۷۶۳	۲/۵۹۰۴
Ge/Au	۱/۱۳۸۸	۹۷/۲۳۰۱	۲/۵۱۸۰
Cu/Au	۰/۹۸۷۵	۹۸/۳۸۴۰	۱/۴۲۲۶

در بین طراحی‌های انجام شده، طرح Cu/Au کمترین جذب و دامنه میدان الکتریکی در لایه‌ی فلزی و بالاترین مقدار بازتاب را دارد. با استفاده از روش ۴، ضخامت‌های چهار جفت لایه ZnS و Ge بر روی زیرلایه‌ی مس را محاسبه کرده و در هر بار اضافه کردن یک جفت لایه، اطلاعات لازم را استخراج کردیم. این اطلاعات در جدول (۵) و (۶) آمده است.

جدول ۵: پارامترهای طرح آینه تمام‌بازتابان فلز-دی‌الکترونیک با بستره‌ی مس

تعداد جفت لایه‌ها	یک	دو	سه	چهار	شماره لایه	ماده
ضخامت نوری (QWOT)						
محیط فرودی	****	****	****	****	هوا	
1	۱/۴۵۱۹	۱/۵۶۱۷	۱/۶۲۳۴	۱/۶۶۴۵	Ge	
۲	۰/۳۴۱۹	۰/۲۵۳۷	۰/۲۱۰۸	۰/۱۸۴۲	ZnS	
3		۱/۴۵۱۹	۱/۵۶۱۷	۱/۶۲۳۴	Ge	
4		۰/۳۴۱۹	۰/۲۵۳۷	۰/۲۱۰۸	ZnS	
5			۱/۴۵۱۹	۱/۵۶۱۷	Ge	
6			۰/۳۴۱۹	۰/۲۵۳۷	ZnS	
۷				۱/۴۵۱۹	Ge	
۸				۰/۳۴۱۹	ZnS	
۹	۰/۱۶۱۷	۰/۱۶۱۷	۰/۱۶۱۷	۰/۱۶۱۷	Au	
بستره	****	****	****	****	Cu	

با مقایسه طراحی‌های لایه‌نشانی روی سولفید و ژرمانیوم بر روی بستره مس، نسبت به حالت نبود این پوشش‌ها (مقایسه اطلاعات جدول ۴ با جدول ۶) مشخص است که در حضور این لایه‌ها، مقدار جذب و بیشترین مقدار دامنه میدان الکتریکی در فلز و در مرز دی‌الکترونیک