بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

# طراحی و ساخت آینه‌ی بازتاب متغیر برای لیزرهای حالت جامد پالسی

**امید شیخی‌کردخیلی[۱]، حسن عبادیان[۱]، مهدی مردیها[۲]، عباس ملکی[۱] و جواد شاه‌محمدی[۲]**

**[۱]پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک‌ولیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر**

**[۲]شرکت صنایع الکترواپتیک صاایران**

**ایمیل: omidsheikhi.k@gmail.com**

**در این تحقیق، بر اساس لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴nm، آینه‌های لیزری بازتاب متغیر(VRM) با مرتبه گاوسی n=۲ با بازتاب ٪۱۵ و n=۵ با بازتاب ٪۲۰ طراحی و ساخته شده است. مقایسه نتایج تجربی و نظری حاکی از اجرای دقیق لایه-نشانی و تنظیم پارامترهای طراحی می‌باشد. این آینه‌ها در چیدمان مشدد Q-سوییچ شده نصب و در نرخ تکرار ۱۰Hz با انرژی ۱۰۰mJ/pulse با پهنای زمانی پالس۱۲ns مورد آزمون قرار گرفتند. بررسی‌های میکروسکوپی نشان‌دهنده عدم وجودآثار تخریبی در سطوح لایه‌نشانی شده می‌باشد.**

کلید واژه- آینه‌های بازتاب متغیر، VRM، مشدد لیزری، لایه‌نشانی، Q-سوییچ.

# Design and fabrication of variable reflection mirrors for pulsed solid-state lasers

**O. Sheikhikordkheili, H. Ebadian, M. Mardiha, A.Maleki, J. Shahmohammadi**
**Email: omidsheikhi.k@gmail.com**

**In this research, based on Nd: YAG pulsed solid state laser at 1064 nm, variable reflectivity laser mirrors(VRM) with Gaussian order n=2 with reflection of 15% and n=5 with reflection of 20% have been designed and manufactured. Comparison of experimental and theoretical results, indicates the accurate implementation of coating and adjustment of design parameters. These mirrors were installed in a Q-switched resonator arrangement and tested at a repetition rate of 10Hz at 100mJ/pulse with a pulse width of 12ns. Microscopic examinations show the absence of destructive effects on the coated surfaces.**

Keywords: Variable Reflectivity Mirrors, laser resonator, Optical coating, Q-switched.

.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05 ]

## مقدمه

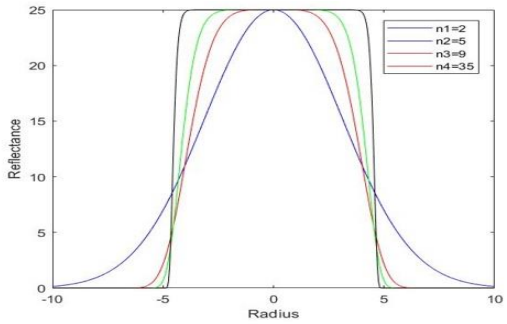
یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تولید پرتوهای محدود شده پراشی با انرژی یا توان بالا، استفاده از مشددهای ناپایدار است که در آن پرتو خروجی در اطراف لبه آینه خروجی گرفته می‌شود. در مشددهای ناپایدار معمولی، پرتو خروجی در اطراف لبه یک آینه کاملاً بازتابنده استخراج می‌شود و یک شکل حلقوی با حلقه‌های بسیار برجسته توسط موجک‌های پراشی که از لبه آینه ناشی می‌شوند، تولید می‌کنند [۱و۲]. یکی از روش‌ها برای غلبه بر این مشکل، استفاده از آینه‌هایی با مشخصات بازتاب متغیر شعاعی(VRM) می‌باشد[۲]. در نتیجه چنین آینه‌هایی به‌ویژه در مشددهای ناپایدار جذاب به نظر می‌رسند، جایی که تولید مدهای گاوسی با حجم مدی زیاد را ممکن می‌سازند[۳]. در این تحقیق، طراحی و ساخت آینه‌های لیزری بازتاب متغیر برای لیزرهای پالسی حالت جامد Nd:YAG ارائه خواهد شد.

## اصول طراحی

طراحی آینه VRM به وضوح به طراحی مشدد لیزر مرتبط است. در واقع، قله بازتاب و شکل آینه VRM به شدت به پارامترهای مشدد بستگی دارد و باید به دقت بهینه شود تا تعادل خوبی بین پرشدگی موثر ماده فعال لیزر و پراش در دهانه آن ایجاد شود. برای کاهش بازتاب آینه خروجی، ساده‌ترین روش، حداقل از نظر تحلیلی، ایجاد یک نمایه بازتابی گاوسی است. با این حال، منحنی گاوسی دارای دنباله بلندی است و برای جلوگیری از اثرات پراش ناشی از دهانه ماده فعال، اندازه لکه پرتو باید نسبتاً کوچک باشد. در نتیجه به نظر می‌رسد که نمایه‌های زنگوله‌ای مسطح‌تر، نتایج بهتری را ارائه می‌دهند. برای این منظور، نمایه‌های بازتابی با شدت سوپرگاوسی را که به شکل تحلیلی زیر تعریف شده‌اند در نظر گرفته‌ایم[۴]:

$$R = R_0 \exp\left[-2(r/\omega)^n\right] \qquad (۱)$$

که در آن $R_0$ قله شدت بازتاب، r مختصات شعاعی، ω اندازه لکه آینه، و n مرتبه سوپرگاوسی است. نمایه هایی از این نوع برای چند مقدار n در شکل(۱) آمده است.

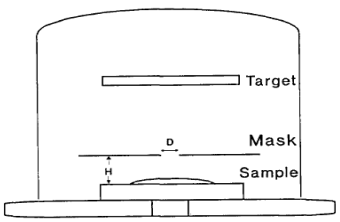



شکل۱: نمایه بازتاب برای n های مختلف

شکل‌ها در مرکز صاف‌تر هستند و نسبت به منحنی گاوسی با شیب بیشتری به صفر می‌رسند. اگر n به بی-نهایت برود، آینه تبدیل به آینه‌ای با نمایه یکنواخت معمولی با شعاع ω می‌شود[۴].

## فرایند لایه‌نشانی

برای تولید آینه‌هایی با بازتاب گاوسی و سوپرگاوسی باید بتوان لایه‌هایی را با ضخامت متغیر شعاعی با مشخصات مناسب لایه‌نشانی نمود. در این پژوهش شبیه‌سازی‌های لایه‌نشانی و بازتاب با استفاده از نرم‌افزار طراحی لایه‌نشانی Macleod در طول موج ۱۰۶۴nm انجام گرفت. در ساخت این نوع از آینه‌ها بهتر است که از موادی با آستانه تخریب پذیری بالا مانند $SiO_2$، $TiO_2$، $ZrO_2$، $HfO_2$، $Ta_2O_5$ و از بسترهایی مانند BK۷ و Fused quartz استفاده شود. به-منظور ایجاد لایه‌نشانی با ضخامت متغیر حتما باید از ماسک به جهت ایجاد اثر سایه‌زنی استفاده نمود. طرح واره‌ای از چیدمان کلی لایه‌نشانی با ماسک در شکل(۲) نشان‌داده شده است.



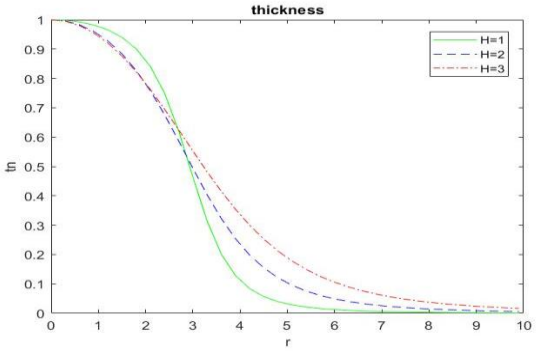

شکل۲: طرح واره اجرای لایه نشانی متغیر

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05 ]

در این تحقیق از یک ماسک ثابت- بستره ثابت با روزنه‌ای دایره‌ای بین منبع تبخیر و بستره که فاصله ماسک تا بستره بسیار کوتاه‌تر از فاصله ماسک تا منبع می‌باشد، استفاده شده است. بر اساس شکل(۲)، اثر سایه زنی ماسک، لایه ضخامت متغیر شعاعی ایجاد می‌کند که البته مشخصات آن عمدتاً به قطر ماسک(D) و فاصله بین ماسک و بستره(H) مربوط می‌شود. اثر روزنه ماسک باعث ایجاد ضخامتی می‌شود که که در محور مرکزی حداکثر و با فاصله شعاعی کاهش می‌یابد. با کنترل پارامترهای هندسی (D,H) می‌توان مشخصات ضخامت لایه‌ها و در نتیجه وابستگی شعاعی بازتاب آینه را کنترل کرد[۴]. روزنه ماسک به عنوان یک منبع گسترده در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که فاصله بین منبع تبخیر و ماسک زیاد است، تعداد برخوردهایی که توسط مولکول‌ها تجربه می‌شود به قدری زیاد است که روزنه را به عنوان یک منبع صفحه‌ای با قانون $\cos\theta$ در نظر می‌گیریم[۵]. ضخامت هندسی ماده لایه‌نشانی شده در یک نقطه از سطح بستره واقع در فاصله شعاعی r با در نظر گرفتن سهم مناطق مختلف اولیه صفحه روزنه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

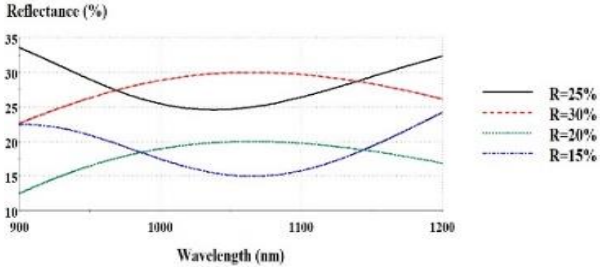
$$t(r)=\frac{4m}{\mu\pi^2 D^2}\int_0^{\frac{D}{2}}\int_0^{2\pi}\frac{H^2\rho d\rho d\varphi}{(H^2+r^2+\rho^2-2r\rho\cos\varphi)^2} \quad (۲)$$

که $\mu$ چگالی ماده لایه‌نشانی شده، m کل جرم ساطع شده از منبع و $(\rho,\varphi)$ مختصات قطبی در صفحه روزنه هستند. در شکل (۳) نمونه‌ای از محاسبات ضخامت لایه بر حسب فاصله r و پارامترهای (D,H) نشان داده شده است.




شکل۳: محاسبه ضخامت لایه نشانی وابسته به شعاع برای D=۴

ایجاد ضخامت متغیر برای تولید آینه‌های VRM به روش‌های ۱) نشست تک لایه متغیر، ۲) نشست تک لایه متغیر بین پشته‌ای از لایه‌ها با ضخامت یکنواخت و ۳) نشست تمام لایه با ضخامت متغیر[۶] که به دلیل تغییرات مشابه ضخامت لایه‌ها و فرایند لایه‌نشانی پیوسته و نیز کاهش زمان فرایند لایه‌نشانی و کاهش خطر آلودگی، روش سوم برای ساخت آینه VRM انتخاب گردید. در این تحقیق از روش تبخیر با باریکه الکترونی(e-Beam) که یکی از روش‌های انباشت بخار فیزیکی(PVD) مواد می‌باشد استفاده شد. در این کار برای ساخت آینه VRM مورد نظر، ابتدا دو لایه از مواد تانتالیوم‌اکسید($Ta_2O_5$) و سیلسیوم‌اکسید($SiO_2$) به‌عنوان لایه‌نشانی پادبازتاب(AR) بدون ماسک و با ضخامت یکنواخت بر روی بستره‌ای از نوع BK۷ نشست داده شد. در مرحله بعد این بستره‌ها در کوره قرار گرفته و طی یک برنامه با زمان‌بندی مشخص به آنها حرارت داده شد. سپس برای نشست لایه‌های متغیر از مواد $ZrO_2$ و $SiO_2$ با تعداد ۳ لایه بصورت متناوب و با نرخ انباشت به ترتیب ۰٫۳ و ۰٫۵ nm/s استفاده نمودیم. نتایج شبیه سازی‌ها با نرم افزارMacleod در شکل(۴) برای بازتاب های مختلف ارائه شده است(بازتاب٪۱۵ و ۲۰٪ مد نظر ما می‌باشد).

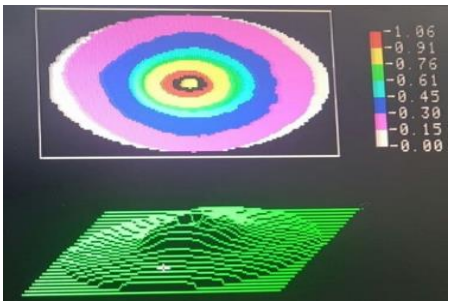



شکل۴: طراحی نمایه بازتاب های مختلف در Macleod

## آزمایش و اندازه‌گیری تجربی

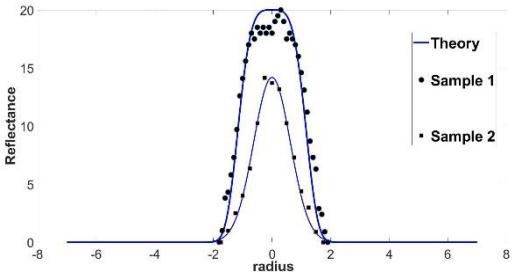
در ابتدا برای اطمینان از نشست لایه با ضخامت متغیر شعاعی و شکل گاوسی آن، آینه‌ها را در دستگاه تداخل‌سنجی لیزری ZYGO قرار داده و مشاهده شد که شکل لایه‌ها و ضخامت در توافق خوبی با طراحی ما در نرم‌افزار Macleod بود که در شکل شماره(۵) آمده است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05 ]



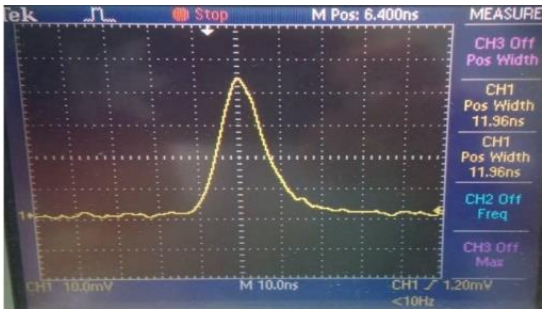

شکل۵: اندازه‌گیری نمایه ضخامت با zygo

البته به منظور اطمینان از لایه‌نشانی انجام شده بهتر است که از ادوات بیضی‌سنجی بدین منظور استفاده گردد. در آزمایش بعدی برای بدست آوردن نمایه بازتاب، آینه‌های VRM را در چینش رانش آزاد(Free running) لیزر Nd:YAG قرار داده و با استفاده از یک روزنه و یک عدسی با فاصله کانونی ۵۰mm اقدام به کوچک سازی قطر لکه تا ۵۰۰µm نمودیم. سپس نمونه‌ها را در یک نگهدارنده مکانیکی با سه درجه آزادی xyz قرار داده و با گام ۱۰۰µm در جهت عمود بر تابش باریکه آزمون جاروب انجام شد. سپس نمایه بازتاب بر اساس نقاط جاروب شده بدست آمده و با استفاده از قابلیت برازش نرم‌افزار MATLAB نتایج تجربی را با نتایج نظری مقایسه نمودیم که در شکل شماره (۶) آمده است.




شکل۶: مقایسه نمایه بازتاب نظری و عملی با استفاده از برازش برای نمونه‌های $n_1$=۲ و $n_2$=۵

در ادامه به منظور بررسی عملکرد آینه‌های ساخته شده در سیستم‌های لیزری، در یک چیدمان لیزر Nd:YAG پالسی Q-سوییچ قرار داده شدند. سلول الکترواپتیکی نصب شده در مشدد لیزری از نوع $KD^*P$ بوده که در ولتاژ چارک-موجی ۴KV عملکرد داشته است. خروجی پالس Q-سوییچ شده در شکل(۷) آمده است.




شکل۷: نمایه پالس Q-سوییچ شده.

آینه مورد نظر در نرخ تکرار پالس ۱۰Hz در عملکرد Q-سوییچ در پهنای پالس ۱۲ns تحت آزمون قرار گرفت و بررسی دوره‌های متوالی تکرار پالس حاکی از عدم وجود تخریب اپتیکی برروی سطح آینه می‌باشد که بررسی میکروسکوپی نیز مؤید این موضوع بوده است.

## نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق برای طراحی و کاربرد آینه‌های بازتاب متغیر ارائه شده است. نمایه گوسی و سوپر گوسی به دست آمده حاکی از نزدیک بودن فرایند طراحی و ساخت می باشد.در این تحقیق کالیبراسیون ادوات لایه‌نشانی از اولین الزامات می‌باشند. عملکرد این آینه‌ها درمشددهای لیزری Q-سوییچ شده نشان دهنده دوام لازم در برابر تخریب های ناخواسته اپتیکی می‌باشد.

## مرجع‌ها

[**1**] S. De Silvestri, P. Laporta, V. Magni and O. Svelto, "Solid-state laser unstable resonators with tapered reflectivity mirrors: the super-Gaussian approach," *in* IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 24, no. 6, pp. 1172-1177, June 1988.

[**2**] Magni, V., Valentini, G. & De Silvestri, S. Recent developments in laser resonator design. Opt Quant Electron 23**,** 1105–1134 ,1991.

[**3**] Lavigne, Pierre, Nathalie McCarthy and J G Demers "Design and characterization of complementary Gaussian reflectivity mirrors: erratum," Appl. Opt. 24, 4278-4278 ,1985.

[**4**] G. Emiliani, A. Piegari, S. De Silvestri, P. Laporta, and V. Magni, "Optical coatings with variable reflectance for laser mirrors," Appl. Opt. 28, 2832-2837 1989.

[**5**] A. Dinca; V. Lupei; P. Dinca; "Design of graded reflectivity mirrors for YAG:Nd lasers",SPIE vol. 2206, 554-562, 1994.

[**6**] G. Duplain, P. G. Verly, J. A. Dobrowolski, A. Waldorf, and S. Bussière, "Graded-reflectance mirrors for beam quality control in laser resonators," Appl. Opt. 32, 1145-1153, 1993.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05 ]