بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی آینه‌های چندلایه با پاشندگی بالا به کمک روش بهینه سازی چندانبوهه ذرات

هانیه کریمیان سرخس و مهرداد شکوه صارمی

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده – در این مقاله طراحی آینه‌های پاشنده به کمک روش بهینه سازی چندانبوهه ذرات انجام شده است. دو آینه پاشنده در دو بازه طیفی ۱۰۲۲ تا ۱۰۳۸ نانومتر و ۱۵۲۵ تا ۱۵۵۵ نانومتر به ترتیب برای نوسان سازهای لیزری *Yb:YAG* و *Cr:YAG* طراحی شده‌اند. نتایج طراحی نشان می‌دهند که با تعداد لایه بهینه، می‌توان به نتایج مطلوبی دست یافت. روش بهینه سازی پیشنهادی، نرخ همگرایی بالا و توانایی جستجوی سراسری قوی دارد و می‌تواند برای طراحی انواع مختلف فیلترهای لایه نازک مفید واقع شود.

کلید واژه‌ها- آینه پاشنده، بهینه سازی انبوه ذرات، فیلترهای لایه نازک.

Application of multi-swarm optimization method to the design of multilayer high-dispersion mirrors

Hanieh Karimian-Sarakhs and Mehrdad Shokooh-Saremi

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract- Design of high-dispersion mirrors (HDMs) using a proposed multi-swarm optimization method is reported. We design HDMs for Yb:YAG disk oscillator around 1030 nm and ultrashort pulse Cr:YAG laser around 1550 nm. The results show that the optimum group delay dispersion and reflectance can be obtained with optimal number of layers. The proposed optimization method has a fast convergence rate and powerful global search ability and can be utilized effectively for the design of a variety of optical thin film filters.

Keywords: Dispersive mirror, Particle swarm optimization, Thin film filters.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

در تکنولوژی لیزرهای با پالس کوتاه، پاشندگی موادی مانند تیتانیوم-یاقوت که برای تولید بهره در این لیزرها به کار می‌روند، عامل اصلی محدودیت در تولید پالس‌های کوتاه است. آینه‌های پاشنده چندلایه می‌توانند برای جبران این محدودیت بکار گرفته شوند. این آینه‌ها انرژی پالس خروجی را محدود نمی‌کنند، کم حجم هستند و می‌توانند در حالت کلی روی بازه‌های طیفی وسیع و باریک مورد استفاده قرار گیرند. آینه‌های با پاشندگی بالا به منظور جایگزینی منشورها و توری‌ها در سیستم‌هایی که نیاز به جبران پاشندگی تأخیر گروه بزرگی دارند (بزرگتر از $۱۰۰۰fs^2$)، طراحی می‌شوند. در این زمینه، موضوعاتی مانند ساختارهای چندلایه با حداقل تعداد لایه‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی سریعتر در طراحی آینه پاشنده [۱] هنوز جای بحث و بررسی دارند. حداقل کردن تعداد لایه‌های ممکن در طراحی یک ساختار چندلایه از جمله آینه پاشنده، باعث کاهش احتمال خطای وابسته به ساخت و همچنین کاهش هزینه‌ها می‌شود. در طول هجده سال گذشته الگوریتم‌های مختلفی برای طراحی این آینه‌ها به کار رفته‌اند، اما هنوز یافتن الگوریتم سریعتر در بهینه‌سازی و یا یافتن ساختار چندلایه با کمترین تعداد لایه موضوع تحقیق و بررسی می‌باشند [۲]. در این مقاله روش بهینه‌سازی چندانبوهه ذرات برای طراحی دو آینه پاشنده در سیستم‌های تقویت کننده پالس چیرپ‌دار فمتوثانیه‌ای برای لیزرهای Yb:YAG در ۱۰۳۰ نانومتر و Cr:YAG در ۱۵۵۰ نانومتر معرفی می‌شود. در این طراحی‌ها، بازتابش تا حد امکان بالا (بزرگتر از ۹۹ درصد) و پاشندگی تأخیر گروه منفی به اندازه $۲۲۰۰fs^2$ مطلوب می‌باشند که به طور همزمان و با استفاده از روش بهینه سازی پیشنهادی بهینه شده‌اند.

۲- روش طراحی

در مراجع [۱] و [۳] طراحی آینه پاشنده با ترکیب روش حوزه زمان و بهبود سوزنی به همراه معرفی تابع شایستگی جدیدی نسبت به روش‌های کلاسیک، انجام شده است. همچنین در [۲] به کمک روش بهبود سوزنی و تحول تدریجی، طراحی آینه پاشنده برای نوسان‌سازها و تقویت-کننده‌های پالس چیرپ‌دار صورت گرفته است. در [۴] روشی به نام الگوریتم ممتیک[1]، که یک نوع بهبود یافته از الگوریتم ژنتیک است، برای بهینه‌سازی آینه‌های چیرپ‌دار معرفی شده است. یکی از پژوهش‌هایی که در آن از روش بهینه‌سازی انبوه ذرات[2] در طراحی آینه چندلایه پاشنده استفاده شده است، توسط لیو[3] و همکاران در سال ۲۰۱۰ انجام گرفته است [۵]. طراحی دیگری توسط باعدی و همکاران انجام شده و در آن فیلتر میان‌گذر باند باریک توسط این الگوریتم طراحی شده است [۶]. روش بهینه‌سازی انبوه ذرات نرخ همگرایی بالا و عملکرد موثری دارد. همچنین تاکنون پژوهش ناچیزی روی اثر پارامتر تعداد لایه‌ها و کنترل آن برای رسیدن به جواب بهینه با استفاده از این روش انجام شده است، این الگوریتم می‌تواند پایه‌ای مناسب برای روش پیشنهادی در طراحی آینه پاشنده باشد.

مشابه دیگر روش‌های مبتنی بر جمعیت، تعدادی ذره در یک انبوه وجود دارد. هر ذره به عنوان یک نقطه در فضای جستجوی N بعدی در نظر گرفته شده و با یک بردار N پارامتری به صورت $X_m = \{X_{1m}, X_{2m}, \dots, X_{Nm}\}$ بیان می‌شود. m یک عدد صحیح است و شماره ذره در انبوه را نشان می‌دهد. مناسب بودن هر نقطه توسط مقدار تابع شایستگی آن مشخص می‌شود. هر ذره شامل یک موقعیت و یک سرعت است. سرعت نرخ تغییر مکان می‌باشد و با $V_m = \{v_{1m}, v_{2m}, \dots, v_{Nm}\}$ بیان می‌شود. این ذره‌ها در یک فضای چند بعدی، جستجو را آغاز می‌کنند و دو توانایی استدلال ضروری دارند که عبارتند از: حافظه‌ای از بهترین موقعیت خودشان و آگاهی از بهترین ذره در همسایگی یا در کل اجتماع. اعضای یک اجتماع (انبوه)، موقعیت‌های خوب را در اختیار یکدیگر قرار می‌دهند و درنهایت هر ذرّه موقعیت و سرعت خود را براساس همین موقعیت‌های خوب تنظیم می‌کند. معادلات بروزرسانی سرعت و مکان ذرات در الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات استاندارد به صورت زیر مدل می‌شوند:

$$\mathbf{V}_m^{k+1} = w\mathbf{V}_m^k + c_1 rand_1()\,(\mathbf{P}_m - \mathbf{X}_m^k) + c_2 rand_2()\,(\mathbf{G} - \mathbf{X}_m^k) \qquad (۱)$$

[1] Memetic
[2] Particle Swarm Optimization (PSO)
[3] Luo

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

$$\mathbf{X}_m^{k+1}=\mathbf{X}_m^k + \mathbf{V}_m^k \quad (۲)$$

در معادلات بالا w در طی فرآیند بهینه‌سازی به صورت خطی از ۰/۷ تا ۰/۴ کاهش می‌یابد. rand() عملگر تصادفی یکنواخت است و عددی در بازه صفر ویک تولید می‌کند. c_1 و c_2 ضرایب شتاب و مقادیری ثابت هستند. $\mathbf{P}_m$ و $\mathbf{G}$ به ترتیب بهترین مکان ذره m-ام در بین مکان‌های خودش و بهترین مکان در انبوه ذرات می‌باشند [۷].

با توجه به اینکه پارامتر تعداد لایه‌ها در فیلترهای لایه نازک نوری حائز اهمیت می‌باشد و ملاحظات اقتصادی برای آن وجود دارد و نیز هزینه پوشش‌ها و همچنین احتمال خطای مربوط به ساخت با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد، یافتن طراحی بهینه با تعداد لایه کمتر سودمند می‌باشد. از این رو برای رفع محدودیت ثابت بودن تعداد لایه‌ها، از روش بهینه‌سازی چند انبوهه استفاده کردیم. در نتیجه با در نظر گرفتن حداقل و حداکثر برای تعداد لایه‌ها در یک طراحی، می‌توان کنترلی روی تعداد لایه‌ها قرار داد و مشخص کرد که آیا می‌توان با تعداد لایه کمتر از بیشینه مورد نظر به پارامترهای بهینه دست یافت.

در این مقاله از روش بهینه‌سازی چند انبوهه ذرات استفاده شده است. در این روش چندین انبوه داریم که هرکدام دارای ذراتی با تعداد لایه‌های متفاوت می‌باشند. به این صورت که مثلاً انبوه اول شامل ذرات با N_{min} لایه (حداقل تعداد لایه‌ها)، انبوه دوم N_{min+1} لایه‌ای و به همین ترتیب تا انبوه آخر که با N_{max} لایه (حداکثر تعداد لایه‌ها) فرض شدند. سرعت و مکان ذرات در هر انبوه به صورت مجزا توسط معادلات ۱ و ۲ به روز رسانی می‌شوند. پس از اینکه در تمام انبوه‌ها بهینه‌سازی انبوه ذرات استاندارد انجام شد و بهترین ذره در هر انبوه (G_{Ni}) به دست آمد، از بین آنها بهترین ذره (G_{Global}) انتخاب می‌شود و مکان مربوط به آن ذره به عنوان ضخامتهای مطلوب در نظر گرفته شده و برایش بازتابش و پاشندگی تأخیر گروه محاسبه می‌شوند.

در این مقاله بازه ۳۵ تا ۶۵ برای تعداد لایه‌ها انتخاب شده و لذا هر انبوه با ۳۰ ذره در نظر گرفته شده است. تابع شایستگی بکار رفته در این طراحی مشابه معادله بکار رفته در [۵] به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{M} = \sum_\lambda W_R(\lambda)\left[\frac{R(\lambda)- R_{target}(\lambda)}{R(\lambda)}\right]^4 + \sum_\lambda W_{GDD}(\lambda)\left[\frac{GDD(\lambda)- GDD_{target}(\lambda)}{GDD(\lambda)}\right]^2 \quad (۳)$$

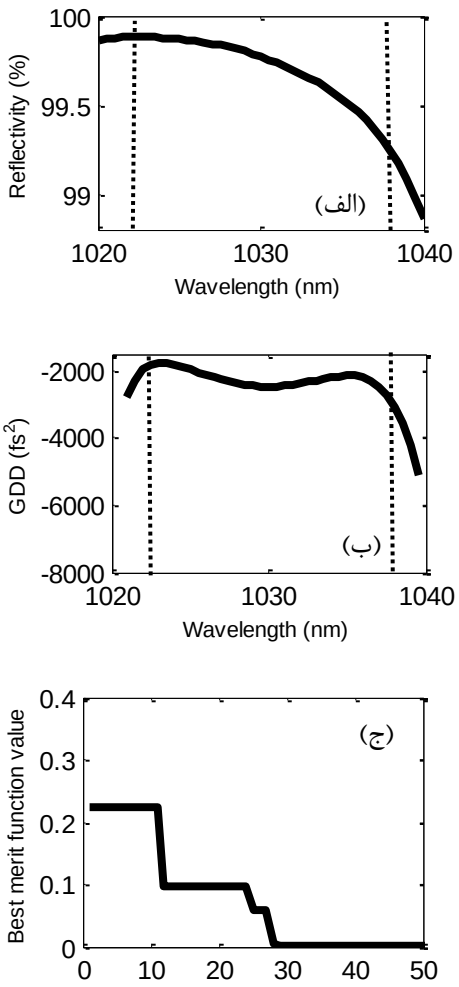
در معادله بالا، λ طول موج، R و R_{traget} بازتاب‌های محاسبه شده و مطلوب می‌باشند. همچنین GDD و GDD_{traget} پاشندگی تأخیر گروه محاسبه‌شده و مطلوب در نظر گرفته شده‌اند. W_R و W_{GDD} به ترتیب ضرایب وزنی برای بازتابش و پاشندگی تأخیر گروه هستند.

۳- نتایج

دو طراحی در این قسمت معرفی می‌شوند. در بخش اول یک آینه پاشنده در بازه طیفی ۱۰۲۲ تا ۱۰۳۸ نانومتر با کاربرد در نوسان‌ساز فمتوثانیه‌ای لیزری Yb:YAG طراحی شده است. لیزر Yb:YAG یکی از لیزرهای قابل تنظیم در بازه طیفی ۶۸۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر است. در این طراحی، بازتابش تا حد امکان بالا (بزرگتر از ۹۹ درصد) و پاشندگی تأخیر گروه منفی به اندازه $۲۲۰۰fs^2$ مطلوب می‌باشد. این طراحی آینه پاشنده نسبت به طراحی معرفی شده در مقاله [۲] با همین مشخصات، تعداد لایه کمتری دارد. زمان طراحی با کامپیوتری با پردازنده Core i7 (۱/۶ GHz) و حافظه ۶ گیگابایت، تقریباً ۱۰ دقیقه می‌باشد. شکل ۱ نتایج به دست آمده برای بازتابش، پاشندگی تأخیر گروه و تابع شایستگی مربوط به بهترین ذره را نشان می‌دهد که برای ۴۹ لایه به دست آمده‌اند. تعداد تکرار در این طراحی ۵۰ می‌باشد.

در بخش دوم یک آینه پاشنده در بازه طیفی ۱۵۲۵ تا ۱۵۵۵ نانومتر با کاربرد در نوسان‌ساز و تقویت‌کننده پالس چیرپ‌دار Cr:YAG طراحی شده است. لیزر Cr:YAG یکی از لیزرهای با کاربرد در باند فروسرخ می‌باشد [۸]. بهینه‌سازی برای همان مقادیر مطلوب در بخش اول و در بازه طیفی ۱۵۲۵ تا ۱۵۵۵ نانومتر انجام شده است. در اینجا زمان طراحی با همان کامپیوتر بخش قبل، تقریباً ۱۵ دقیقه می‌باشد. شکل ۲ نتایج به دست آمده برای بازتابش، پاشندگی تأخیر گروه، و تابع شایستگی مربوط به بهترین ذره را نشان می‌دهد. فیلتر بهینه دارای ۵۰ لایه است و با ۵۰ تکرار به دست آمده است.

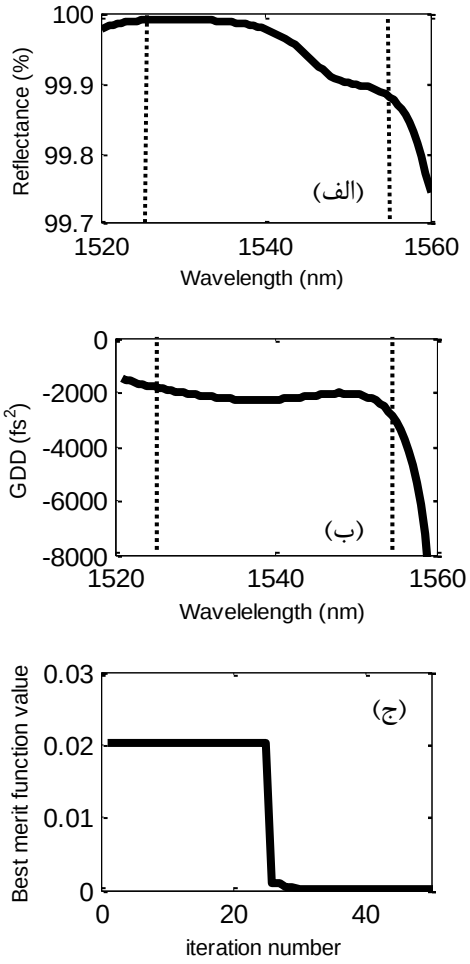
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]



شکل ۱: نتایج بدست آمده برای بهترین ذره برای نوسان ساز Yb:YAG حول ۱۰۳۰ نانومتر: (الف) بازتابش، (ب) پاشندگی تأخیرگروه، و (ج) تابع شایستگی بهترین ذره بر حسب تعداد تکرار.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به دشواری طراحی آینه پاشنده و بهینه کردن همزمان بازتابش و پاشندگی تأخیر گروه، در این مقاله روش بهینه سازی چندانبوهه ذرات برای طراحی چنین فیلترهایی معرفی شده است. در این روش طراحی با در نظر گرفتن یک بازه برای تغییر تعداد لایه‌ها و در نتیجه با داشتن درجه آزادی بیشتر، به نتایج بهینه دست یافتیم. حتی نشان داده شد که می‌توان در بازه طیفی وسیعتر و با تعداد تکرار و لایه کمتری نسبت گزارشات گذشته، به پارامترهای مطلوب و بهینه دست یافت. با توجه به نتایج بدست آمده، روش چند انبوهه ذرات را می‌توان ابزاری قدرتمند در طراحی فیلترهای چند لایه نوری در نظر گرفت.



شکل ۲: نتایج بدست آمده برای بهترین ذره برای نوسان ساز Cr:YAG حول ۱۵۴۰ نانومتر: (الف) بازتابش، (ب) پاشندگی تأخیرگروه، و (ج) تابع شایستگی بهترین ذره بر حسب تعداد تکرار.

مراجع

[1] Y. Wang, J. Shao, W. Zhang, Ch. Wei, J. Huang, Y. Jin, K. Yi and Z. Fan, *Design and analysis of different types of dispersion mirrors*, **Chin. Opt. Lett**. 8 (2010) 18-20.

[2] V. Pervak, C. Teisset, A. Sugita, S. Naumov, F. Krausz, and A. Apolonski, *High-dispersive mirrors for femtosecond lasers*, **Opt. Express** 16 (2008) 10220-10233.

[3] V. Pervak, I. Ahmad, J. Fulop, M. K. Trubetskov, and A. V. Tikhonravov, *Comparison of dispersive mirrors based on the time-domain and conventional approaches for sub-5-fs pulses*, **Opt. Express** 17 (2009) 2207-2217.

[4] V. Yakovlev and G. Tempea, *Optimization of chirped mirrors*, **Appl. Opt**. 41 (2002) 6514-6520.

[5] Z. Luo, W. Shen, X. Liu, P. Gu, and C. Xia, *Design of dispersive multilayer with particle swarm optimization method*, **Chin. Opt. Lett**. 8 (2010) 342-344.

[6] J. Baedi, H. Arabshahi, M. Gordi Armaki and E. Hosseini, *Optical design of multilayer filter by using PSO algorithm*, **Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol**. 2 (2010) 56-59.

[7] M. Shokooh-saremi and R. Magnusson, *Particle swarm optimization a*nd its application to the design of diffraction grating filters, **Opt. Lett**. 32 (2007) 894-896.

[8] E. Sorokin, V. L. Kalashnikov, J. Mandon, G. Guelachvili, N. Picqué, I.T. Sorokina**,** *Cr:YAG chirped pulse oscillator*, **New J. Phys.** 10 (2008) 083022.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]