بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

طراحی تشدیدگر لیزر دیسک پرتوان با هدف تزویج باریکه خروجی به فیبر

سعید عربگری ، مهتاب اصل دهقان، مجتبی مصلحیان و سید شهرام کاظمی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

Email: arabgari@inlc.ir, asldehghan@inlc.ir, moslehian@inlc.ir, kazemi@inlc.ir

چکیده – در لیزرهای دیسک نازک پرتوان شعاع انحنای دیسک نازک با افزایش توان دمش تغییر کرده و موجب تغییر مشخصات باریکه خروجی لیزر همچون قطر لکه و کیفیت پرتو می شود. یکی از اثرات تغییر مشخصات باریکه خروجی، پیچیده و دشوار شدن محاسبات و نیز عملیات تزویج باریکه خروجی لیزر به فیبر است. در این مقاله روشی برای طراحی تشدیدگر با هدف کاهش تغییرات مشخصات باریکه خروجی تشدیدگر و نیز ساده سازی عملیات تزویج ارائه شده است. همچنین مساله اصلی در محاسبات مربوط به تزوج باریکه لیزری به فیبر، محاسبه حداقل قطر باریکه کانونی شده قابل حصول می‌باشد که بر پایه آن قطر بهینه هسته فیبر انتخاب می‌شود. محاسبه این کمیت برای تشدیدگر معرفی شده به سادگی مقدور است که فرمول آن استخراج و ارائه شده است.

کلید واژه- تزویج باریکه لیزری به فیبر، تشدیدگر، دیسک نازک، قطر باریکه لیزری

A Method for designing high power thin-disk laser resonator for appropriate beam coupling into fiber

Saeed Arabagri, Mahtab Asle Dehghan, Mojtaba Moslehian and Seyed Shahram Kazemi

Iranian National Center for Science and Technology

Email: arabgari@inlc.ir, asldehghan@inlc.ir, moslehian@inlc.ir, kazemi@inlc.ir

Abstract- **In high power thin-disk lasers, the changes in pump power cause variation of radius of curvature of thin-disk and therefore output beam characteristics such as beam diameter and beam quality. These variations are very destructive when coupling the laser beam into a fiber and also make the coupling process and exact calculations very difficult and sophisticated. In this article a method for designing the resonator is presented which reduces the variation of output beam specification and simplifies the coupling process.** Also the main problem of coupling calculation is to evaluate the least achievable focused beam diameter which is vital to choose the optimum core diameter for fiber. This parameter is extracted for introduced resonator and presented.

Keywords: Beam spot size, Fiber coupling, Resonator, Thin-disk

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

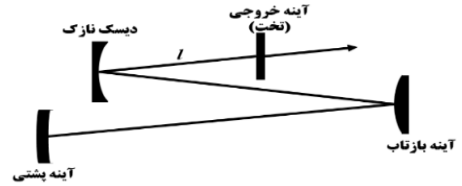
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقدمه

برای بهره‌برداری مناسب از لیزرهای دیسک نازک لازم است باریکه خروجی آنها را به فیبر تزویج نمود. برای یک تزویج بهینه باید باریکه لیزری را به فیبری با کمترین قطر هسته ممکن تزویج نمود تا کیفیت پرتو باریکه لیزری دستخوش کمترین تخریب شود. برای محاسبه کمترین قطر هسته فیبر، لازم است تا حداقل قطر لکه کانونی شده قابل استحصال توسط لنزهای تزویجگر (D_{fmin}) را برای یک لیزر دیسک محاسبه کرد. انجام این محاسبات برای لیزرهای دیسک نازک با دشواری‌هایی همراه است. در این لیزرها، ماده فعال دیسک نازک به عنوان یکی از آینه‌های تشدیدگر عمل می‌کند اما با این ویژگی که با تغییر توان دمش، شعاع انحنای آن تغییر می‌کند. با تغییر شعاع انحنای دیسک، مشخصات باریکه خروجی از جمله قطر باریکه و نیز کیفیت پرتو تغییر می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود تا قطر باریکه کانونی شده توسط لنز تزویجگر و محل با آن تغییر توان دمش دیسک تغییر کند. با این اتفاق عملیات تزویج و نیز محاسبه D_{fmin} بسیار پیچیده خواهد شد. در این مقاله طرح تشدیدگری ارائه شده است که با استفاده از آن مشکلات بر شمرده برای تزویج رفع خواهد شد.

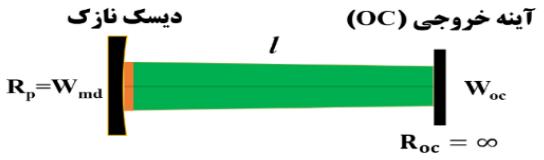
طراحی تشدیدگر برای تزویج مناسب

شکل ۱ تشدیدگر Z شکلی را نشان می‌دهد که در آن آینه خروجی تخت بوده و دیسک در مجاورت این آینه قرار دارد.



شکل ۱. شمای تشدیدگری که با تغییر شعاع انحنای دیسک، باریکه خروجی آن موازی بوده و قطر آن ثابت باقی می‌ماند.

ادعای ما این است که این تشدیدگر می‌تواند باریکه خروجی‌ای را بدست دهد که تا حد قابل قبولی موازی بوده و با تغییر شعاع انحنای دیسک، قطر مقطع باریکه تقریبا ثابت باقی بماند. با این دو ویژگی مشکلات برشمرده برای تزویج هم از نظر محاسباتی و هم از عملیاتی برطرف خواهد شد. برای بررسی علت ثابت ماندن قطر باریکه خروجی این تشدیدگر با تغییر شعاع انحنای دیسک، کافی است انتشار باریکه در بازوی انتهایی تشدیدگر بررسی کرد (شکل ۲).



شکل ۲. بازوی انتهایی تشدیدگر شامل دیسک و آینه خروجی

در تشدیدگرها شعاع انحنای موج نوسانی با شعاع انحنای آینه خروجی برابر است لذا با توجه به تخت بودن آینه خروجی، کمره باریکه نوسانی بر روی این آینه واقع می‌گردد. این اولین خاصیت این تشدیدگر است. از آنجا که ناحیه دمش دیسک، نقش روزنه داخلی را برای تشدیدگر ایفا می‌کند، با تغییر شعاع انحنای دیسک و کیفیت پرتو باریکه، اندازه شعاع لکه تشدیدگر روی دیسک همواره ثابت و برابر با شعاع دمش (Rp) خواهد بود [۱]. با احتساب این نکته که شعاع لکه باریکه لیزری (W_m) با کیفیت پرتو M^2 در هر جای تشدیدگر از ضرب شعاع لکه مدپایه (W_0) در مجذور کیفیت پرتو بدست می‌آید [۲]:

$$w_m = \sqrt{M^2}\, w_0 \qquad (۱)$$

اندازه شعاع لکه مدپایه روی دیسک (W_{0d}) خواهد شد:

$$w_{0d} = \frac{R_p}{\sqrt{M^2}} \qquad (۲)$$

با داشتن W_{0d} می‌توان با استفاده از روابط انتشار باریکه‌های گاوسی (مدپایه)، شعاع مدپایه روی آینه خروجی (W_{00}) را بدست آورد. از آنجا که کمره مدپایه به تبع باریکه تشدیدگر در آینه خروجی قرار دارد، رابطه زیر بین شعاع لکه مدپایه روی آینه خروجی و دیسک برقرار خواهد بود [۳]:

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

$$w_{0d} = w_{00}\sqrt{1+\left(\frac{l}{z_0}\right)^2}, \quad z_0 = \frac{\pi}{\lambda}{w_{00}}^2 \qquad (۳)$$

در رابطه فوق l فاصله بین دیسک و آینه خروجی، z_0 طول ریلی مدپایه و λ طول موج لیزر می‌باشد. با توجه به روابط (۱) و (۳) رابطه بین شعاع باریکه روی دیسک (w_{md}) و روی آینه خروجی (w_{m0}) برای باریکه لیزری با کیفیت پرتو M^2 به صورت زیر خواهد بود:

$$w_{md} = w_{m0}\sqrt{1+\left(\frac{l}{z_0}\right)^2} \qquad (۴)$$

دقت کنید که $W_{md}=R_p$ است که با تغییرات شعاع انحنای دیسک ثابت باقی می‌ماند. اکنون اگر W_{md} برابر با W_{m0} شود شعاع باریکه لیزری روی آینه خروجی نیز ثابت خواهد بود. برای برابر بودن این دو کمیت لازم است که در رابطه (۴) $(l/z_0)^2 \ll 1$ باشد در این صورت با اندکی عملیات ریاضی اختلاف نسبی بین این دو کمیت (η) بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{(w_{md}-w_{m0})}{w_{m0}} \cong \frac{1}{2}\left(\frac{l}{z_0}\right)^2 \qquad (۵)$$

اگر مطلوب ما η کمتر از نیم درصد باشد، خواهیم داشت:

$$\eta \le \frac{1}{200} \Rightarrow \frac{1}{2}\left(\frac{l}{z_0}\right)^2 \le \frac{1}{200} \qquad (۶)$$

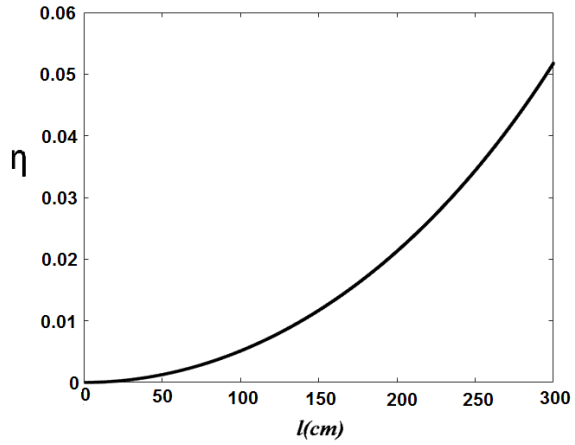
با توجه به اینکه شعاع باریکه روی کمره و دیسک تقریبا برابرند می‌توان در شرط (۶) در فرمول z_0 به جای شعاع کمره مدپایه، شعاع مدپایه روی دیسک را جایگزین کرد:

$$\frac{\pi}{\lambda}{w_{0d}}^2 \ge 10l \Rightarrow w_{0d} \ge \sqrt{10\frac{\lambda}{\pi}l} \qquad (۷)$$

با قراردادن λ=1030nm شرط فوق برای لیزر دیسک بصورت زیر خواهد بود:

$$w_{0d}(mm) \ge 1.8\sqrt{l(m)}, \quad l(m) \le \frac{w_{0d}^2(mm)}{3.24} \qquad (۸)$$

در رابطه بالا w_{od} بر حسب میلیمتر و l بر حسب متر می‌باشد. اکنون لیزر دیسک A را در نظر می‌گیریم که در آن M^2=15 و R_P=7mm است، از شرط (۷) بدست می‌آید که اگر l<1.0m باشد قطر لکه روی آینه خروجی کمتر از نیم درصد با قطر دمش دیسک اختلاف نسبی خواهد داشت. برای راستی‌آزمایی نتایج بدست آمده از شرط (۷)، با انتشار دقیق باریکه گاوسی برای لیزر دیسک A، کمیت η را به ازای lهای مختلف محاسبه و نتیجه را در نمودار شکل ۳ رسم نموده‌ایم.



شکل ۳. تغییرات کمیت η بر حسب تغییر طول بازوی l

ملاحظه می‌شود که با افزایش طول بازو، η افزایش یافته و در l=1m این کمیت برابر با ۰،۰۰۵ می‌شود که نشان از صحت شرط بدست آمده دارد. گرچه این رابطه برای کیفیت پرتو ۱۵ بدست آمد اما با توجه به رابطه (۲) و (۶) برای کیفیت پرتوهای کوچکتر از این مقدار، حتما η کوچکتر نیز خواهد بود. با توجه به این نکته می‌توان برای هر طول بازوی l کیفیت پرتویی بیشینه‌ای را بدست آورد که برای مقادیر کوچکتر از آن، کمیت η کمتر از نیم درصد خواهد بود:

$$M^2 \le \frac{R_P^2(mm)}{3.24l(m)} \qquad (۹)$$

طبق رابطه (۹) اگر طول بازو l=0.5m و Rp=7mm باشد به ازای M^2<30 کمیت η کمتر از نیم درصد خواهد بود.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

حداقل قطر لکه کانونی قابل استحصال

با شرط (۶)، باریکه خروجی بسیار موازی خواهد بود چرا که طول ریلی $z_0 \geq 10l$ می‌شود که در قیاس با طول چیدمان تزویج بسیار بزرگ است. برای دیسک A اگر کیفیت پرتو با تغییر توان دمش از ۱۰ تا ۱۵ تغییر کند، طول ریلی از ۱۵ تا ۱۰متر متفاوت خواهد بود که باریکه‌ای بسیار موازی است. معمولا فاصله کانونی لنزهای تزویجگر f=50mm است که در فاصله نیم‌متری از آینه خروجی قرار می‌گیرند. با توجه به برقراری شرط (۶)، رابطه $(z_0/f)^2 \ll 1$ نیز برقرار خواهد بود. با این شرط، محل کمره باریکه پس از کانونی شدن توسط لنز تزویجگر، در محل کانون این لنز خواهد بود. استفاده از روابط انتشار باریکه گاوسی نشان می‌دهد که جابجایی محل کمره در بازه تغییرات کیفیت پرتو لیزر دیسک A، در حدود ۶ میکرون است [۳]. این موضوع عملیات تزویج را بسیار ساده و مطمئن خواهد کرد. اندازه شعاع کمره باریکه لیزری (W_{mf}) برای یک باریکه تابشی موازی برابر است با [۲]:

$$w_{mf} = \sqrt{M^2}\, f\theta_{00}, \quad \theta_{00} = \frac{\lambda}{\pi w_{00}} \qquad (۱۰)$$

که Θ_{00} واگرایی مدپایه تابشی به لنز است که می‌توان آنرا بر حسب شعاع کمره مدپایه که در محل آینه خروجی است نوشت. به دلیل موازی بودن باریکه خروجی از تشدیدگر، شعاع کمره مدپایه با شعاع مدپایه روی لنز (W_{0l}) تقریبا برابر است. با اندکی عملیات ریاضی و با استفاده از رابطه (۹) شعاع کمره باریکه در کانون لنز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$w_{mf} = \frac{\lambda}{\pi}\left(\frac{M^2}{\frac{w_{ml}}{f}}\right) \qquad (۱۱)$$

در رابطه بالا W_{ml} شعاع باریکه لیزری روی لنز است. رابطه فوق آشکار می‌سازد که اندازه شعاع لکه کانونی شده با W_{ml}/f رابطه معکوس دارد که حداکثر این نسبت، برابر با روزنه عددی فیبر، NA، است. لذا حداقل قطر لکه کانونی قابل استحصال توسط لنز تزویجگر برابر خواهد بود با:

$$D_{f\min} = \frac{2\lambda}{\pi}\frac{M^2}{NA} \qquad (۱۲)$$

اگر روزنه عددی فیبر NA=0.14 باشد در این‌صورت برای لیزر دیسک A، D_{fmin}=70μm خواهد بود. بنابراین قطر هسته فیبر بهینه برای این باریکه ۱۰۰ میکرون است. به این ترتیب بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده، برای تشدیدگر طراحی شده، حداقل قطر هسته فیبری که می‌توان در آن باریکه لیزر دیسک را تزویج کرد بدست آمد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تشدیدگری برای لیزرهای دیسک طراحی شد که علی رغم تغییر شعاع انحنای دیسک در حین افزایش توان دمش، باریکه خروجی از آنها موازی بوده و قطر آن تقریبا ثابت می‌ماند. در این حالت محل کانونی شدن باریکه توسط لنز تزویجگر در کانون این لنز بوده و در حد قابل قبولی ثابت باقی می‌ماند که این موضوع عملیات تزویج را ساده می‌کند. از طرف دیگر با این مشخصات، بدون انجام محاسبات عددی پیچیده می‌توان حداقل قطر لکه کانونی قابل استحصال از باریکه لیزری را بدست آورد که این موضوع امکان انتخاب قطر فیبر بهینه با هدف حفظ کیفیت پرتو را میسر می‌سازد.

مرجع‌ها

[1] S. Arabgari, M. Aghaie, *Thin-Disk Laser Resonator Design: The Dioptric Power Variation of Thin-Disk and The Beam Quality Factor*, Optik, (2019), DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.03.148

[2] N. Hodgson, H. Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation*, Springer, Chapter 2, (2005)

[3] H. Kogelnik and T. Li, *Laser Beams and Resonators*, Applied Optics, Vol. 5, No. 2, P. 1550.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]