بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

طراحی و ساخت لیزر فیبری ۵ کیلو وات به روش ترکیب آرایه‌ای

حسین فتحی، ابراهیم آقایاری، علی همدانی گلشن، سید ناصر طباطبایی جعفری، مجید لفوتی، کامران حجاز، وحید وطنی، محمدصادق ذبیحی و سیدحسن نبوی.

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران.

چکیده - در این مقاله، طراحی و ساخت لیزر فیبری ۵ کیلو وات گزارش شده‌است. برای ساخت این لیزر، ۵ لیزر فیبری با توانی بیش از ۱ کیلو وات با طول‌موج ۱۰۸۰ نانومتر به روش آرایه‌ای با هم ترکیب شده‌اند. برای ترکیب پرتوهای لیزری، از منشورهای راست گوشه استفاده شده‌است. با طراحی و ساخت یک شاسی و جابجاگرهایی با ۵ درجه آزادی جهت نگه داشتن منشورها و تنظیم اپتیکی باریکه‌های لیزری، پرتوها به فیبری با مغزی ۲۰۰ میکرون و گشودگی عددی ۰٫۲۲ تزویج شده‌اند. کیفیت پرتو نهایی در راستاهای x و y به ترتیب ۱۹٫۲ و ۲۶٫۴ اندازه‌گیری گردید و بازده توانی ترکیب حدود ۹۷ درصد است.

کلید واژه- لیزر فیبری، ترکیب آرایه‌ای پرتوها.

Design and Fabrication of 5 KW Fiber Laser Using Array Beam Combining

Hossein Fathi, Ebrahim Aghayari, Ali Hamedani Gholshan, Seyed Naser Tabatabaei Jafari, Kamran Hejaz, Majid Lafouti, Vahid Vatani, Mohammad Sadegh Zabihi, Seyed Hassan Nabavi.

Iranian National Center for Laser Science and Technology (INLC), Tehran, Iran.

Abstract- Design and fabrication of a 5 kW fiber laser is reported. Manufacturing this laser is accomplished by means of lens array combining technique of five all-fiber lasers with power more than 1 kW, at 1080 nm wavelength. Right angle prisms are used for laser beam combination. Five output beam of lasers are coupled into a fiber with 200μm core diameter and NA=0.22. This made possible by design and fabrication of a module containing 5-degrees of freedom positioners to hold prisms and alignment of laser beams. The final output beam quality factor M^2 is measured 19.2 and 26.4 along the x- and y-axis respectively and the combining power efficiency is about 97%.

Keywords: Fiber Laser, Array Beam Combining.

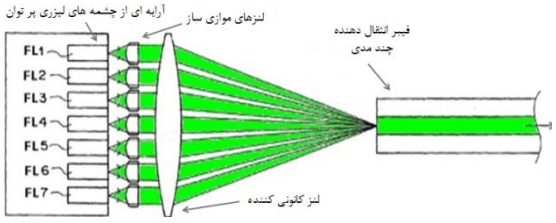
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در عرصه طراحی و ساخت فیبرهای نوری و لیزرهای دیودی، امکان ساخت فیبرهایی با ناحیه مدی بزرگ و لیزرهای دیودی با درخشندگی بالا حاصل شده است. این امر سبب شده تا لیزرهای فیبری هم از جهت توان و هم از نظر کیفیت پرتو، متحول شوند. این لیزرها به دلیل داشتن برتری‌های خاص، در رتبه‌ی اول لیزرهای صنعتی قرار گرفته‌اند. از جمله مزیت‌های لیزرهای فیبری می‌توان به قابلیت دستیابی به توان‌های بالا، کیفیت پرتو عالی، کم‌حجم بودن، طول‌عمر طولانی، پایداری مناسب، هزینه پایین تعمیر و نگهداری، بازده اپتیکی بالا، خنک‌سازی آسان و بکارگیری ساده‌تر در مقایسه با سایر لیزرهای صنعتی اشاره نمود.

با توجه به محدودیتی که در ساخت ماژول‌های لیزری فیبری پرتوان وجود دارد، ابتدا باید ماژول‌هایی با حداکثر توان ممکن ساخته و سپس آنها را با یکدیگر ترکیب نمود. از جمله محدودیت‌های یاد شده، می‌توان به نوع رفتار قسمت‌های مختلف اجزا تشکیل‌دهنده لیزر همچون ماده فعال، ترکیب‌کننده‌ها و آینه‌های فیبری در توان‌های بالا اشاره نمود. توجه به اثرات غیرخطی و حرارتی هنگام ساخت لیزر از اهمیت زیادی برخوردار است. در حالت کلی پرتوهای لیزری می‌توانند با چهار روش همدوس[1]، طیفی[2]، قطبشی[3] و آرایه‌ای[4] با یکدیگر ترکیب شوند. در این کار از روش ترکیب آرایه‌ای با توجه به عدم نیاز به المان‌های کنترلی و قابلیت صنعتی‌سازی استفاده شده است. طرح‌واره‌ای از این روش در شکل ۱ آورده شده‌است.



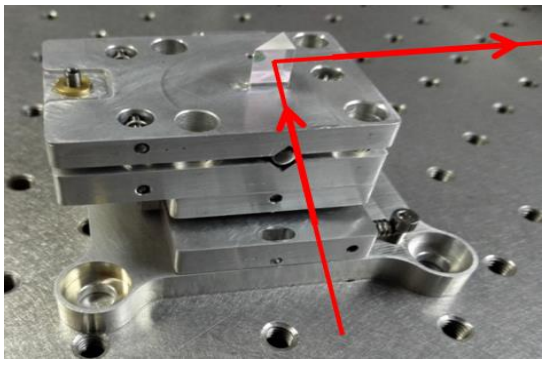
شکل ۱: طرح‌واره‌ی روش ترکیب آرایه‌ای لیزرهای فیبری.

در روش ترکیب آرایه‌ای، باریکه‌های متعددی از لیزرهای فیبری پرتوان توسط آرایه‌ای از لنزها، موازی‌شده و با استفاده از لنز تزویج‌گر در فیبر انتقال‌دهنده تزویج می‌شوند. توان و اندازه‌ی پرتو ترکیب شده متناسب با تعداد المان‌ها بوده و واگرایی آن، به اندازه‌ی واگرایی یک المان منفرد می‌باشد. بنابراین در این روش، درخشندگی پرتو نهایی کمتر و در بهترین حالت برابر با درخشندگی تک‌المان خواهد بود.

در این مقاله با ترکیب پنج لیزر فیبری با توانی بیش از ۱ کیلو وات، با روش ترکیب آرایه‌ایی و در نهایت با تزویج پرتو حاصله درون یک فیبر نوری، امکان دست‌یابی به یک پرتو با توان ۵ کیلوات فراهم شده‌است.

۲- شبیه‌سازی ترکیب پرتوها

لیزرهای فیبری مورد استفاده برای ترکیب، دارای فیبرهای خروجی با مغزی-غلاف ۲۰/۴۰۰ میکرون و گشودگی عددی ۰/۰۶ هستند. قسمت انتهایی این فیبرها به یک کانکتور-کالیماتور ساخت شرکت Optoskand متصل شده است. لنز موجود در این کالیماتور دارای فاصله کانونی ۵۰mm با پوشش ضدبازتاب در ناحیه‌ی IR می‌باشد. این لنز سبب می‌شود تا پرتو خروجی از آن دارای اندازه لکه ۶mm و واگرایی ۰/۴mrad باشد. از مشخصات بسیار مهم در ترکیب آرایه‌ای، ضریب پرشدگی پرتوهای کنار هم چیده‌شده می‌باشد. این مشخصه به صورت نسبت قطر یک لکه (d) به فاصله بین مراکز لکه‌ها (D) تعریف می‌شود و مشخص‌کننده اندازه‌ی نهایی لکه‌های کنار هم چیده‌شده بر روی لنز تزویج‌گر می‌باشد. برای رسیدن به ضریب پرشدگی بزرگ‌تر و اندازه لکه‌ی کوچک‌تر بر روی لنز تزویج‌گر از منشورهای راست‌گوشه استفاده شده‌است. پرتو خروجی هر لیزر توسط منشور ۹۰ درجه تغییر جهت داده و در راستای تزویج‌گر قرار می‌گیرد. برای نصب منشورها و اعمال تغییر جهت ذکر شده، جابجاگرهایی با ۵ درجه آزادی طراحی و ساخته شد (شکل ۲).



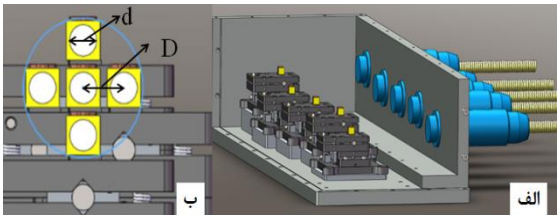
شکل ۲: نمای چیدمان منشور و نگه دارنده آن.

هر کدام از منشورها در صفحه عمود بر راستای تزویج‌گر نسبت به هم دارای جابجایی عرضی و افقی هستند و در

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

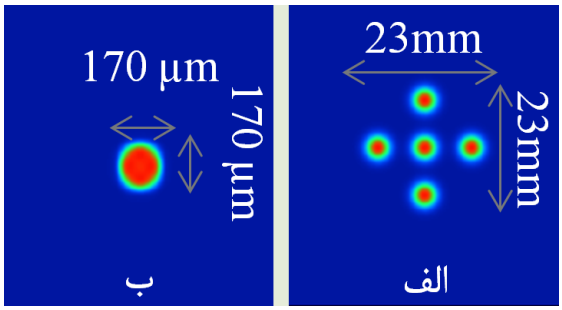
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

امتداد راستای تزویج‌گر، در فاصله‌های طولی منظمی، نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. مقدار این جابجایی‌های عرضی و افقی به اندازه لکه‌ی هر یک از لیزرها و ابعاد منشورهای استفاده شده و فاصله طولی منشورها به ابعاد کالیماتور خروجی لیزرها و مانت‌های نگهدارنده منشورها بستگی دارد. ابعاد منشورها ۷٫۵×۷٫۵ میلیمتر و فاصله‌ی عرضی بین آنها ۸٫۵ میلیمتر است. نتیجه این ترکیب، پرتویی با ضریب پرشدگی ۶۶ درصد و اندازه لکه‌ی ۲۴ میلیمتری بر روی لنز تزویج‌گر است (شکل ۳).



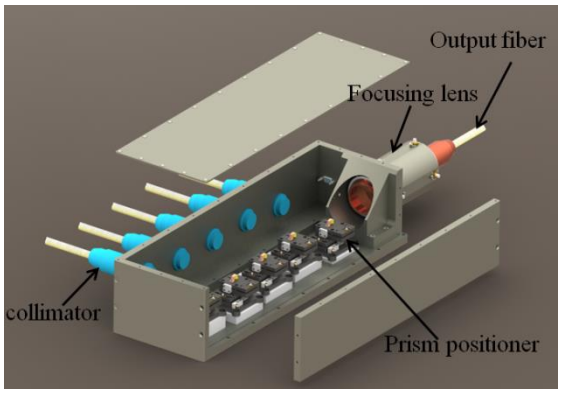
شکل ۳: الف- چیدمان منشورها، بر روی شاسی، ب- فاصله‌ی بین منشورها و لکه‌ها، در نمای عرضی، D=8.5mm ,d=6mm.

شبیه‌سازی ترکیب این لکه‌ها و تزویج آنها به فیبر توسط نرم افزار Zemax صورت گرفته‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از لنزی با فاصله کانونی ۲۰۰mm و قطر دهانه ۲ اینچ، اندازه لکه‌ای برابر با ۱۷۰μm در محل کانون ایجاد می‌کند (شکل۴). این اندازه لکه، قابلیت تزویج نور به فیبرهای با مغزی ۲۰۰μm و بالاتر را فراهم می‌کند. در چیدمان آزمایشگاهی و همچنین در چیدمان صنعتی شده آن، تزویج به فیبر با مغزی ۲۰۰μm صورت گرفته‌است.



شکل ۴: الف- شبیه‌سازی نمایه‌ی پرتو بر روی لنز تزویج‌گر، ب- نمایه‌ی لکه کانونی شده توسط لنز تزویج‌گر.

پس از انجام شبیه‌سازی اپتیکی، طراحی شاسی و چیدمان اجزا ترکیب در نرم‌افزار Solidworks انجام پذیرفت. طرحواره‌ای از این چیدمان در شکل ۵ قابل مشاهده است.



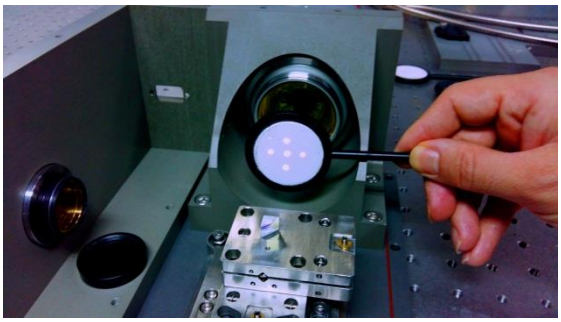
شکل ۵: طرحواره‌ی چیدمان ترکیب آرایه‌ای لیزرهای فیبری.

۳- نتایج تجربی

پس از آماده‌سازی شاسی و تجهیزات مورد نیاز ترکیب آرایه‌ای، کالیماتور لیزرهای مورد استفاده برای ترکیب و نگهدارنده‌های منشور بر روی شاسی ترکیب نصب گردید. منشورها با استفاده از چسب اپتیکی مخصوص بر روی نگهدارنده‌ها نصب شد. پرتوهای لیزری پرتوان با استفاده از این منشورها، تغییر مسیر ۹۰ درجه‌ای داده و به صورت موازی با یکدیگر و در فاصله عرضی یکسان نسبت به هم، وارد تزویج‌گر می‌شوند. در تزویج پرتوها، بازدهی ترکیب با توازی پرتوهای ورودی و فاصله بین آنها رابطه مستقیم دارد. از اینرو تنظیمات اپتیکی اولیه با استفاده از نگهدارنده‌های منشور، در توان پایین انجام گردید و پروفایل پرتوها در محل ورودی لنز تزویج‌گر همانند شکل۴-الف مشاهده شد. با توجه به ابعاد منشورها و چگالی توان بالا، تست حرارتی هریک از منشورها در توان یک کیلوات انجام شد. حداکثر دمای مشاهده شده برای منشورها، ۳۴ درجه‌ی سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. میزان اتلاف در بازتاب از منشورها کمتر از ۰٫۳ درصد محاسبه گردید. پس از نصب تزویج‌گر، هم‌راستاسازی محور اصلی آن با پرتوهای ورودی انجام گردید (شکل۶). در ادامه فیبری با قطر مغزی ۲۰۰μm و زاویه‌ی پذیرش ۰٫۲۲ به تزویجگر متصل گردید. نمایی از سیستم ترکیب نهایی در شکل ۷ آورده شده‌است. پس از بهینه‌سازی بازدهی ترکیب با استفاده از پیچ‌های تنظیم تزویج‌گر در توان پایین، بازدهی ترکیب در توان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. برای ترکیب نهایی در توان خروجی ۵ کیلووات از فیبر انتقال ۲۰۰μm، بازدهی ۹۷ درصد به دست آمد.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

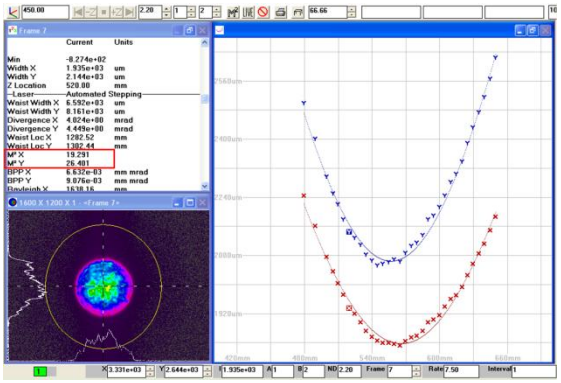


شکل ۶: نمایی از سطح مقطع باریکه های موازی شده قبل از ورود به تزویج‌گر.



شکل۷: نمایی از چیدمان ترکیب آرایه‌ای پرتوهای لیزر فیبری با استفاده از منشورهای راست‌گوشه قرار گرفته بر روی نگهدارنده‌هایی با ۵ درجه‌ی آزادی.

پس از ترکیب آرایه‌ای باریکه‌ها، کیفیت باریکه‌ی نهایی، با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کیفیت باریکه، اندازه‌گیری شد. اعداد به دست آمده برای دو راستای x و y به ترتیب ۱۹٫۲و ۲۶٫۴ به دست آمده است. اختلاف کیفیت پرتو در دو راستا، ناشی از عدم تقارن ناچیز پرتوها در سطح ورودی لنز تزویج‌گر است که با انجام تنظیمات دقیق‌تر و مشاهده هم‌زمان کیفیت پرتو اندازه‌گیری شده، قابل رفع می‌باشد. پروفایل باریکه‌ی نهایی به همراه نتایج مربوط به اندازه‌گیری کیفیت باریکه در شکل ۸ آورده شده‌است.



شکل ۸: اندازه‌گیری کیفیت باریکه، برای پرتو خروجی نهایی از فیبر μ۲۰۰m، در توان ۵ کیلووات، با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کیفیت پرتو (M^2-meter).

۴- نتیجه‌گیری

خروجی ۵ لیزر با توانی بیش از ۱ کیلو وات و در طول‌موج ۱۰۸۰ نانومتر به روش آرایه‌ایی با هم ترکیب شد. برای ترکیب پرتوهای لیزر، از منشورهای راست‌گوشه استفاده شده‌است. با طراحی و ساخت یک شاسی و جابجاگرهایی با ۵ درجه آزادی جهت نگه داشتن و تنظیم اپتیکی باریکه‌های لیزر، پرتوهای خروجی به فیبری با مغزی ۲۰۰ میکرون و گشودگی عددی ۰٫۲۲ تزویج شده‌است. کیفیت پرتو نهایی در راستاهای x و y به ترتیب ۱۹٫۲و ۲۶٫۴ گزارش شده‌است. بازده توانی تزویج به فیبر حدود ۹۷ درصد بوده و میزان بالای بازدهی به دلیل لایه‌نشانی ضدبازتاب در ناحیه IR بر روی اپتیک استفاده شده و سطوح ابتدایی و انتهایی فیبرهای انتقال است. در مجموع توان ۵ کیلووات از فیبر خروجی مشاهده و اندازگیری شد. روش ترکیب آرایه‌ای این قابلیت را دارد که با استفاده از آن بتوان به توان‌های بالاتری نیز دست یافت.

مراجع

[1] Zhou et al, Coherent beam combining of fiber amplifiers using SPGD algorithm and its application, IEEE Journal Of SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTro,V.15, No.2,2009.
[2] O. Andrusyak, *Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density*, Proc. of SPIE Vol. 6453 64531L-1.
[3] R. Uberna, *Coherent polarization beam combination*, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 46, NO. 8, AUGUST2010.
[4] C. Bellanger,A. Brignon, *Design of a fiber-collimated array for beam combining*, Optical Engineering, V.50, No.2,2011.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]