



بازآرایی پروفایل پرتو لیزر دیودی استک برای اتصال به فیبر نوریو افزایش چگالی انرژی در جهت پردازش مواد

سید حامد قاسمی^{۱*}

۱- گروه فیزیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

یک تکنیک شکل‌دهی موثر پرتو که در آن با استفاده از بازآرایی پرتو برای متقارن سازی پارامتر کیفیت پرتو و چگالی توان، از یک لیزر دیودی استک توان بالا با ده بار، از یک صفحه آینه نواری و یک آینه V-Stack در طراحی سیستم شکل‌دهی پرتو به جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. در این تکنیک، پرتو یک لیزر دیودی استک با توان بالا به طور موثر به یک مغزی فیبر با قطر استاندارد ۸۰۰ میکرومتر با گشودگی عددی $NA = 0.22$ تزویج می‌شود. با این تکنیک، پکیدگی، راندمان بالاتر و هزینه تولید کمتر برای دیود استک تزویج شده به فیبر امکان پذیر است. با در دسترس بودن چگالی توان بالا کاربردهای بسیار گسترده تری از لیزرهای دایودی همچون پردازش مواد، جوش، برش و سخت سازی سطوح مورد انتظار است. البته از دیودهای تزویج شده به فیبر نوری می‌توان برای پمپاژ یک لیزر دیگر در جهت بهبود کیفیت پرتو خروجی از لیزر نیز استفاده کرد.

کلمات کلیدی: فیبرنوری، تغییر نمایه خروجی لیزر، لیزر دیودی استک

۱. مقدمه

لیزرهای دایودی تزویج شده به فیبر کاربردهای زیادی از پزشکی تا صنعت دارند. لیزر دایودی بار آرایش خطی از تعداد زیادی گسیلنده نوری هستند. از آنجایی که توان خروجی آنها در سال های اخیر به شدت افزایش یافته است، توان خروجی این بارها در محدوده ۱۰ تا حدود ۱۵۰ وات در طول موج مابین ۸۰۰ نانومتر و ۹۸۰ نانومتر در دسترس است. سطح مقطع پرتو هر گسیلنده دیودی به شکل بیضی است و عرض این گسیلنده‌ها بسیار بزرگتر از ارتفاع آنها است. بنابراین یک لیزر دایودی بار با توان بالا دارای سطح مقطعی در حدود $10\text{mm} \times 0.001\text{mm}$ است. عرض گسیلنده معمولاً از ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر است که در امتداد لیزر دایودی بار با فواصل منظم گسیلنده‌ها مابین ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر توزیع می‌شود. ضریب پراشده‌گی از تقسیم عرض گسیلنده‌ها بر فاصله مابین دو گسیلنده به دست می‌آید، می‌توان دیود بارها را به دو دسته با ضریب پراشده‌گی بالا تا ۹۰ درصد و ضریب پراشده‌گی کم زیر ۳۰ درصد طبقه بندی کرد. محورهای تند و کند مخروط نور خروجی که به ترتیب عمود و موازی با محور بار هستند، واگرایی متفاوتی دارند. زاویه واگرایی پرتو در داخل ۹۵ درصد توان خروجی حدود ۴۰-۹۰ درجه در امتداد محور تند و ۶-۲۰ درجه در امتداد محور کند است. لیزر دایودی استک را می‌توان با برهم نهی لیزر دایودبار با گام های حدود ۱.۸ میلی متر ساخت. برای اکثر کاربردها، پرتو لیزر دیودی به دلیل انعطاف پذیری بیشتر و تقارن شعاعی خوب، توسط فیبر نوری منتقل می‌شود.

لیزرهای دایودی بدون سیستم های شکل دهی پرتو نوری را نمی توان به طور مستقیم در بسیاری از موارد استفاده کرد زیرا ویژگی های انتشار پرتو آنها بسیار واگرا و بسیار نامتقارن است. سیستم های شکل دهی پرتو لیزرهای دایودی با توان بالا اکنون یک گزینه طراحی قابل قبول برای بسیاری از کاربردها هستند و ویژگی های مختلف آنها در حال مطالعه است [۹-۱].

در کار حاضر، برای تزویج کردن لیزر دیود ۱ کیلوواتی به فیبر با قطر هسته ۸۰۰ میکرومتر، یک سیستم شکل دهی پرتو را با استفاده از آینه های نواری و آینه V-Stack شبیه سازی کردیم. با این روش پارامترهای پرتو BPP و تقارن پرتو خروجی بهبود یافت که منجر به کانونی کردن پرتو نسبتاً خوب با چگالی توان بالاتر شد. از مزایای سیستم تزویج پیشنهادی با انتخاب اپتیک تجاری، می توان به پکیدگی بیشتر و هزینه تولید کمتر اشاره کرد.

۲. تغییر نمایه پرتو خروجی از لیزر دایودی استک

راحت ترین راه برای اندازه گیری کیفیت پرتو یک آرایه لیزر دایودی، مشخص کردن پارامتر پرتو محصول (BPP) است که به صورت $\theta \times W$ تعریف می شود، که θ زاویه واگرایی پرتو و W پهنا پرتو است. واگرایی زیاد در محور تند را می توان با استفاده از میکرو عدسی های استوانه ای اصلاح کرد تا پرتو لیزر تا حد زیادی در این محور موازی شود. برای بهبود کیفیت پرتو در محور کند، یک روش، استفاده از آرایه های میکرو لنزی است. برای جلوگیری از همپوشانی در صفحه انتشار، برخی روش های پیچیده تر برای آرایه های لیزر دایودی با گام کوچک تر استفاده شده است [۴].

حداکثر تعداد گسیلنده های دایودی که می توان به یک فیبر تزویج کرد، با تقسیم حاصل ضرب پارامتر پرتو (BPP) فیبر بر BPP یک تک گسیلنده دایودی منفرد بدست می آید. همانطور که در معادلات (۱) و (۲) نشان داده شده است، این در هر دو محور تند و کند انجام می شود. ضریب پرشدگی آرایه دایودی نیز باید در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که شکل کلی پرتو مربع است در حالی که شکل مقطع فیبر دایره ای است، هم در میدان نزدیک و هم در میدان دور:

$$N_{FA} \cong \frac{D_f \theta_f}{2W_{FA} \theta_{FA}} \gamma_{FA} \quad (1)$$

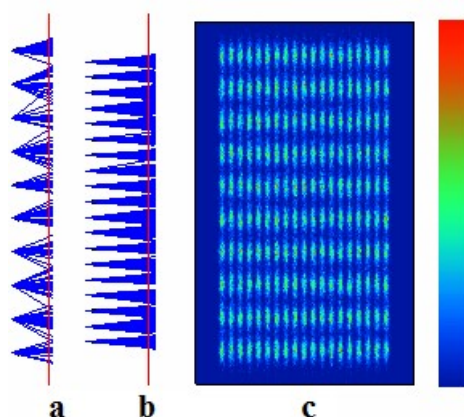
$$N_{SA} \cong \frac{D_f \theta_f}{2W_{SA} \theta_{SA}} \gamma_{SA} \quad (2)$$

که در آن N_{SA} و N_{FA} تعداد گسیلنده های دایودی به ترتیب در محور تند و کند هستند و D_f قطر فیبر و θ_F زاویه کامل خروجی پرتو هستند، W_{FA} و θ_{FA} عرض پرتو و زاویه واگرایی محور تند هستند و γ ضریب پرشدگی است. ضریب ۲ از نسبت هندسه وارد شدن یک پرتو مربعی به یک فیبر گرد است، زیرا اندازه وارد شدن پرتو در فیبر باید کمتر از $\sqrt{2}$ مغزی فیبر باشد، و زاویه ورود پرتو به فیبر باید کمتر از $\sqrt{2}$ برابر گشودگی عددی فیبر باشد. [۷].

برای بهبود عمده کیفیت پرتو و تطابق آن با BPP فیبر انتقال دهنده، در حال حاضر کارآمدترین راه تغییر شکل و بازآرایی پرتوهای موازی شده است [۴]. به طور کلی، این کار با استفاده از عناصر اپتیکی ویژه برای تقسیم پرتو آرایه لیزر دایودی به n قطعه و بازآرایی مجدد آنها به یک پرتو با مقطع متقارن تر که برای کانونی کردن روی نوک فیبر مناسب تر است، انجام می شود. پس از شکل دهی پرتو، BPP در محور کند n برابر کاهش می یابد و در محور تند به همان نسبت افزایش می یابد.

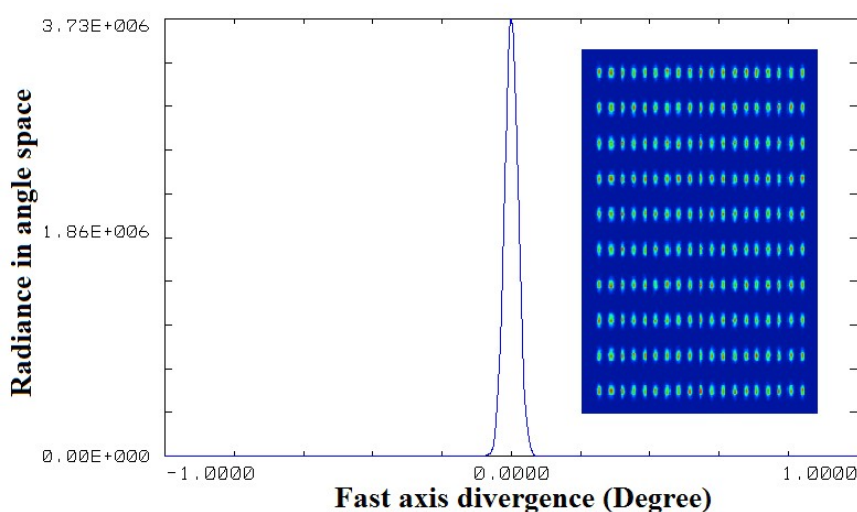
۳. طراحی و نتایج شبیه سازی

شکل دهی پرتو یک لیزر دیودی استک با ۱۰۰ وات خروجی به ازای هر بار در طول موج ۹۷۶ نانومتر و تزویج پرتو خروجی به یک فیبر بر اساس میکرو اپتیک و اپتیک تجاری با استفاده از نرم افزار ZEMAX شبیه سازی شده است. بارها از ۱۹ گسیلنده با وجه تابش 1×100 میکرومتر، با گامی در حدود $500 \mu m$ و فاصله هر بار با یکدیگر ۱.۸ میلی متر تشکیل شده است. واگرایی پرتو خروجی در جهت محور تند و محور کند (FWHM) به ترتیب ۲۸ و ۶ درجه می باشد. شماتیک پرتو خروجی در محور تند و کند و مشخصات پرتو خروجی لیزر دیودی استک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. (a,b) شماتیک پرتو خروجی لیزر دیودی استک با ده بار و ۱۹ گسیلنده در هر بار به ترتیب در جهت محور تند و جهت محور کند نشان داده شده است، و (c) پروفایل شدت پرتو خروجی استک است.

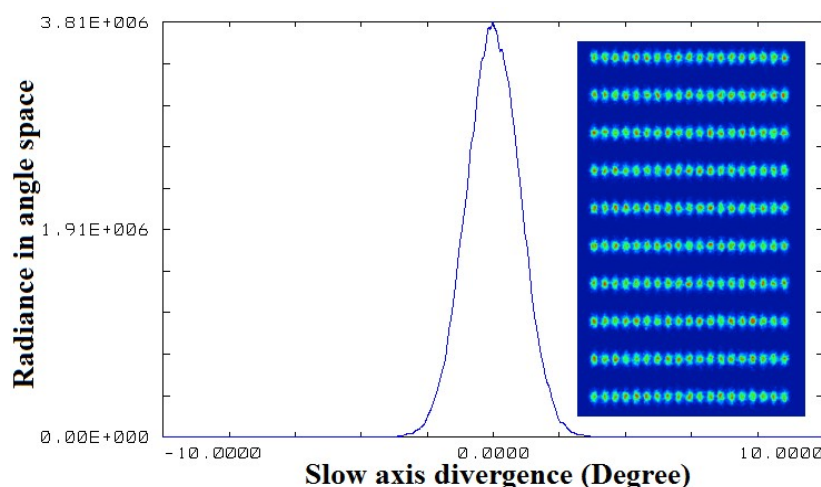
از آنجایی که واگرایی پرتو در محور تند بسیار زیاد است، برای طراحی یک سیستم تزویج موثر، کاهش واگرایی ضروری است. این کار با استفاده از یک میکرو لنز استوانه‌ای با $EFL=0.9mm$ (طبق قطعه استاندارد (FAC-08-900) شرکت Ingeneric) که می‌تواند پرتو خروجی را در محور تند موازی کند، انجام می‌شود. شکل ۲ واگرایی را درست بعد از میکرو لنز استوانه‌ای و نمایه خروجی آن را نشان می‌دهد. واگرایی خروجی گسیلنده‌ها پس از قرارگیری میکرو لنز در جهت محور تند کمتر از 0.8 mrad است.



شکل ۲. واگرایی و نمایه خروجی پس از میکرو لنز بر روی محور تند.

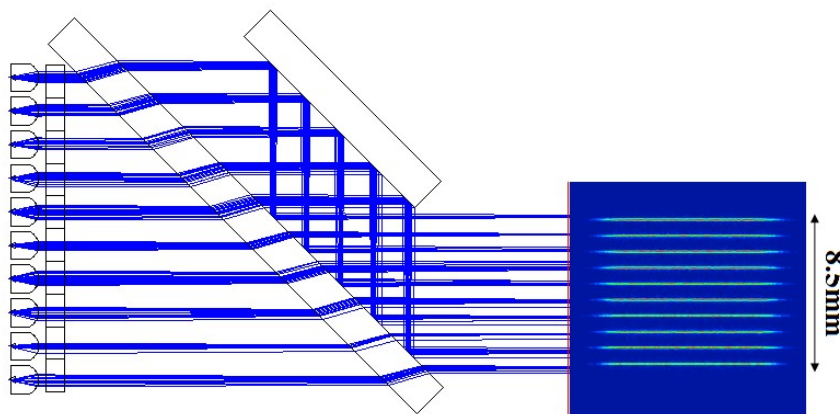
اگرچه واگرایی پرتو در جهت محور کند کم است، موازی سازی آن ما را قادر می‌سازد به نقطه کوچکتري دست یابیم. ما از ده آرایه از میکرو لنزهای موازی کننده محور کند از شرکت (Ingeneric(SAC-030-500)) با $EFL=3mm$ برای کاهش

واگرایی در جهت محور کند تا ۱.۹ درجه استفاده می کنیم. مشخصات خروجی پرتو پس از موازی سازی در جهت محور کند در شکل ۳ نشان داده شده است.



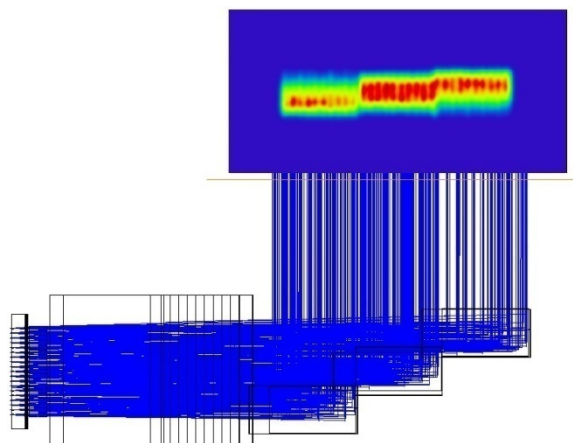
شکل ۳: نمایه خروجی و واگرایی خروجی درست پس از موازی سازی محور کند.

در مرحله بعد بارها در جهت محور سریع به دو قسمت تقسیم می شود که هر قسمت شامل پنج بار است. قسمت بالایی از یک آینه راه راه بازتابنده عبور می کند و از یک آینه با انعکاس بالا بر روی قسمت پایینی آینه راه راه منعکس می شود به گونه ای که فضای خالی مابین پنج پرتو پایین را پر می کند. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، هنگامی که دو قسمت بارها با هم ترکیب می شوند، فاصله بارها از مرکز یکدیگر ۰.۹ میلی متر و ارتفاع کلی آن به ۸.۵ میلی متر می رسد، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است.



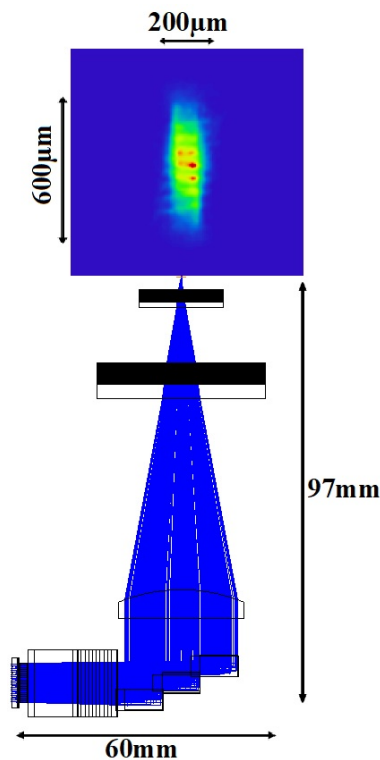
شکل ۴. مشخصات بارها و پروفایل خروجی آینه راه راه

بعد از این مرحله فشرده از یک جفت سه آینه پلکانی که V-Stack نامیده می شود، دوباره بازآرایی می شود. V-Stacks خروجی نامتقارن یک لیزر دیودی استک را به یک نمایه متقارن تر تبدیل می کند. بنابراین، پروفایل بارها پس از تقسیم شدن به ۳ قسمت در جهت کند بر روی هم قرار گرفته و در جهت تند بازآرایی می شود. بدیهی است که با استفاده از V-Stack می توان کیفیت پرتو را با تقسیم به بخش های بیشتری در جهت کند بهبود بخشید. اگرچه کیفیت پرتو را در جهت تند خرابتر می کند، اما تقارن پرتو را افزایش می دهد، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. این تصویر از نمای بالا نشان داده شده است. پروفایل خروجی از یک V-Stack است.

پرتو خروجی پس از عبور از V-Stack از سه عدسی استوانه‌ای عبور می‌کند. لنز استوانه‌ای اول تخت محدب با $EFL=70\text{mm}$ از (Thorlabs) (LJ1477L1) و عدسی استوانه‌ای دوم از ((Doriclens) (D141-0368)(ACL-PCX-INF-BK7-EFL19032)) با $EFL=10\text{mm}$ و عدسی استوانه‌ای سوم از ((Doriclens) (D141-0367)(ACL-PCX-INF-BK7-EFL9686)) با $EFL=20\text{mm}$ روی نوک مغزی فیبر کانونی می‌شود. سیستم تزویج به فیبر و پروفایل ورودی به فیبر در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ابعاد لکه 600×200 میکرومتر و گشودگی عددی پرتو 0.17 است، از این رو می‌توان پروفایل حاصل را به طور موثر در یک مغزی فیبری با قطر استاندارد $800\mu\text{m}$ و گشودگی عددی 0.22 تزویج کرد. بر اساس معادلات ۱ و ۲ برای دایود مذکور اندازه پرتو خروجی در محور تند برابر $722\mu\text{m}$ و در محور کند $466\mu\text{m}$ است. پرتو با این اندازه لکه را می‌توان به فیبری با قطر $1200\mu\text{m}$ تزویج کرد. در طرح پیشنهادی، BPP در جهت محور کند با استفاده از یک V-Stack و یک آینه راه راه سه برابر بهبود می‌یابد و BPP پرتو خروجی با ضریب دو در جهت تند خرابتر می‌شود.



شکل ۶: سیستم تزویج و پروفایل خروجی.

اگرچه در تئوری انتظار می رود که پرتو به فیبری با قطر هسته $400\mu m$ جفت شود، اما نتایج شبیه سازی ما نشان داد که نمی توان فیبری با قطر هسته کوچکتر از $800\mu m$ تزویج کرد. اندازه لکه بر روی نوک فیبر به دلیل افزایش طول مسیر و ابیراهی لنزها گسترده تر می شود. برای تزویج لیزر دایودی ۱ کیلوواتی به فیبر از فیبری به قطر مغزی $800\mu m$ استفاده شد و تعداد عناصر نوری به کار گرفته شده را تا حد امکان کاهش دادیم. همچنین با در نظر گرفتن تلفات نوری عناصر [۳]، چگالی توان خروجی فیبر بیشتر از $1.5 \times 10^5 W/cm^2$ می شود. این چگالی توان مورد علاقه در کاربردهای صنعتی لیزرهای دایودی با توان بالا است.

۴. نتیجه گیری

با استفاده از یک شکل دهی نوآورانه پرتو، تزویج لیزرهای دایودی ۱ کیلوواتی به فیبری با قطر مغزی $800\mu m$ و گشودگی عددی ۰.۲۲ شبیه سازی شده است. سیستم تزویج پیشنهادی برای تزویج لیزر دایودی استک به فیبرها بسیار موثر و پکیدگی خوبی است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که آینه نواری و V-Stack به ترتیب BPP و تقارن پرتو خروجی لیزر دایودی استک را بهبود می دهند. با در دسترس بودن چگالی توان بالاتر از $10^5 W/cm^2$ ، کاربردهای بسیار گسترده تری از لیزرهای دایودی همچون پردازش مواد مورد انتظار است.

۵. مراجع

- [1] W. A. Clarkson, “**Two-mirror beam shaping technique for high-power diode bars**”, *Optics letters*, Vol. 21, No. 6, 375-377 (1996).
- [2] S. Heinemann, L. Leininger, “**Fiber coupled diode lasers and beam-shaped high-power stacks**”, *SPIE*, Vol. 3267, 116-124 (1998).
- [3] F. Dorsch, P. Henning, M. Nickel, “**High-brightness Fiber-coupled diode laser module**”, *Proc. SPIE*, Vol. 3285, 192-198 (1998).
- [4] P. Y. Wang, A. Gheen, Z. Wang, “**Beam shaping technology for laser diode arrays**”, *Proc. SPIE*, Vol. 4770, 131-135 (2002).
- [5] M. Xiao-hui, X. Li, L. Guo-jun, S. Quan-lin, X. De-sheng, Z. Jian-jia, “**Beam shaping and fiber coupling of high power laser diode arrays**”, *Proc. SPIE*, Vol. 5644, 545-548 (2005).
- [6] H. Baker, J. Monjardin, P. Kneip, D. Hall, “**1.8kW diode laser system for fiber-delivery using brightness-enhanced diode stacks and a novel final beam-shaper**”, *Proc. SPIE*, Vol. 6876, 68760W-1-68760W-8 (2008).
- [7] S. Carlsen, R. Price, M. Reynolds, A. Brown, R. Mehl, S. Patterson, R. Martinsen, “**100-W, 105- μ m, 0.15NA fiber coupled laser diode Module**”, *Proc. SPIE*, Vol. 5644-29 (2009).
- [8] N. Coluccelli, “**Nonsequential modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, and experimental validation**”, *APPLIED OPTICS*, Vol. 49, No. 6, 4237-4245 (2010).
- [9] R. Pereira, B. Weichelt, D. Liang, P. J. Morais, H. Gouveia, M. Abdou-Ahmed, A. Voss, and T. Graf, “**Efficient pump shaping for high-power thin-disk laser systems**”, *APPLIED OPTICS*, Vol. 49, No. 27, 5157-5162 (2010).