

ساخت دیودهای لیزری کاربرد مستقیم با درخشندگی بیشتر

خروجی دیودهای لیزری کاربرد مستقیم که به صورت یک باریکه خطی یا به وسیله یک فیبر اپتیکی به قطعه کار منتقل میشود، برای کاربردهایی در گستره عملیات حرارتی و غلاف سازی فلزی تا جوشکاری جذاب هستند. اما دستیابی به سطحی از کیفیت باریکه که مناسب برش فلزات باشد، چالشی دشوار است.

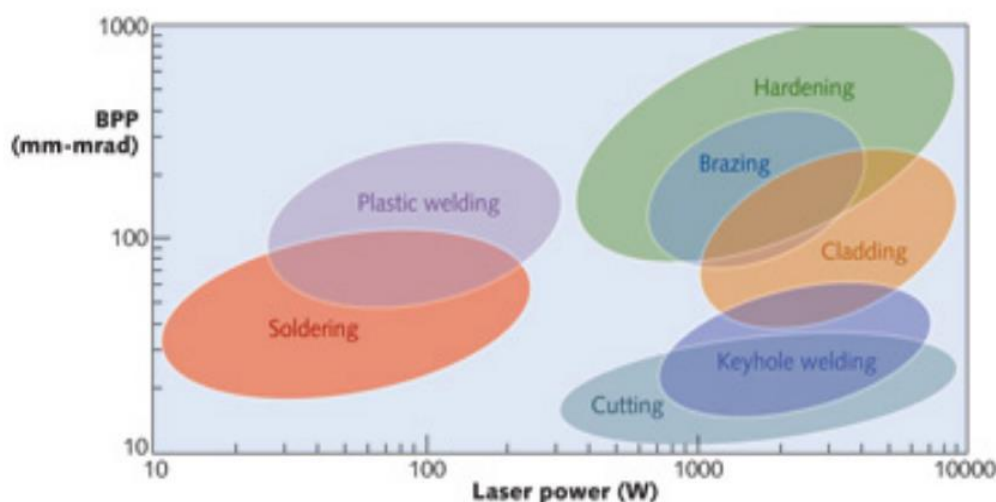
در زمینه تبدیل بهینه ورودی جریان الکتریکی به نور، دیود لیزرها را نمی‌توان مغلوب کرد زیرا تاکنون در آزمایشگاه به بازدهی بیشتر از ۷۰٪ برای این محصول دست یافته‌اند. اما حاصل این پیکربندی گسیل با واگرایی بالا از یک روزنه کوچک است و باریکه حاصل باریکه ای چندان مفید نیست. چالش دیودهای کاربرد مستقیم این است که حداکثر انرژی ممکن به قطعه کار منتقل شود.

تا کنون بهترین کاربردها، کاربردهایی بوده‌اند که انرژی لیزر به صورت یکنواخت پخش می‌کنند، مانند جاروب کردن یک مربع یا باریکه خطی در سرتاسر یک سطح برای عملیات حرارتی یا روکش فلزی که در آنها انرژی به صورت یکنواخت پخش می‌شود. انتقال باریکه توسط فیبر میتواند توان دیود کاربرد مستقیم را در حد شدت مورد نیاز برای جوش فلزات متمرکز کند اگرچه باز این مقدار بسیار کمتر از درخشندگی بالایی است که برای برش فلزات مورد نیاز است.

کیفیت باریکه و کاربردهای مستقیم دیود

توان لیزر دیود حیرت‌آور است، ده‌ها وات از گسیلنده‌های منفرد، صدها وات از بارهای دارای چندین گسیلنده و هزاران وات از استک کردن بارها، اما باریکه‌های حاصل از دیود تابش از لبه به سرعت به صورت عمود بر لایه فعال نازک واگرا شده و چالش‌هایی را در کار با مواد به دنبال دارند.

شکل (۱) مقادیر تخمینی دو پارامتر کلیدی لیزر، کیفیت باریکه و توان خروجی، که هنگام کار با مواد ضروری هستند را نشان می‌دهد. بیشترین کاربرد، یعنی برش فلزات، نیازمند توان بالا و یک لکه پر شدت کوچک است، همانطور که در سمت راست شکل قسمت پایین نشان داده شده است. جوشکاری نیازمند اندازه لکه بزرگتر است تا صفحات را به یکدیگر متصل کند. عملیات حرارتی و روکش فلزی مستلزم توان بالا در سرتاسر یک ناحیه بزرگ است که در سمت راست شکل قسمت بالا نشان داده شده است. جوش مواد پلاستیکی و لحیم فلزات نیازمند توان‌های پایینتر هستند.



شکل ۱- الزامات تقریبی توان و کیفیت باریکه برای کار کردن با مواد انتخابی. جزئیات با پارامترهای ماده تغییر میکند. عموماً باریکه های بزرگتر در کاربردهایی مورد استفاده قرار می گیرند که به کیفیت باریکه بالا نیاز نباشد، مانند سختکاری و روکش فلزی. کاربردهایی که به انرژی بالا نیاز دارند، مانند برش فلزات، به طور معمول مستلزم لکه های کوچک هستند. فاکتور BPP اندازه کیفیت باریکه است.

دیودهای کاربرد مستقیم می توانند به گونه ای ساخته شوند که برای کاربردهای بسیاری مناسب باشند. به گفته آقای فرانک گابلر، رئیس بازاریابی فرآوری مواد در Coherent Inc، دیودهای کاربرد مستقیم منابع گرمایی ایده آلی برای فرآوری گرمایی مساحت بزرگ هستند. مجموعه ای از چندین بار لیزر دارای چندین تابشگر می توانند با یکدیگر استک شده و توان های دیود مستقیم تا ۸ کیلووات را تولید کنند. استک ها با ماسک های شکل دهی باریکه و اپتیک می توانند باریکه هایی از 1×3 میلی متر تا 6×36 میلی متر تولید کنند. به گفته آقای گابلر، یک مد بزرگ با پروفایل سرتخت در کاربردهایی مانند پوشش فلز با غلاف مقاومت برای شفت های فلزی مورد نیاز صنعت نفت بسیار سریع و کارآمد هستند. باریکه های خطی چند کیلوواتی به سرعت مساحت بزرگی را گرم می کنند.

انتقال باریکه توسط فیبر و ترکیب باریکه

فیبرهای اپتیکی می توانند باریکه های دارای شدت بالاتر که مورد نیاز کاربردهای جوش است منتقل کنند. تزویج به فیبر باریکه ای مدور تولید می کند و می تواند خروجی چندین دیود را، هر یک از دستگاه های مجزا یا نوارهای جداگانه در یک بار لیزر، جمع آوری کند.

خروجی بار لیزر دیود به تک فیبر انتقال باریکه تزویج می شود. آسان ترین راهکار، پرهیز از نیاز به اتصال و مفصل کردن فیبرها و ارائه پشتیبانی از محصول در دراز مدت است. به گفته آقای گابلر، فن آوری بار در عمل از جهت پشتیبانی آسانتر است.

از سویی دیگر به گفته مدیر عامل TRUMPF Photonics، آقای جورج تروش، تابشگرهای منفرد توان بیشتری را در هر نوار تولید میکنند و فضای بین نوارهای مجاور روی یک بار به اندازه ای کم است تا همه آنها را در هسته فیبر ۵۰ یا ۱۰۰ میکرونی به یکدیگر متصل کند. اگر چه یک بار دارای ۵۵ تابشگر میتواند در کل ۲۰۰ وات تابش کند، اما فیبرها تنها میتوانند ۱۹ نوار را پوشش دهند که توانی حدود ۵۰ تا ۶۰ وات خواهد بود. با اتصال ۱۹ فیبر یکسان به تابشگرهای منفرد ۱۰ وات، ۱۹۰ وات در فیبر مناسب گردآوری میشود.

اندازه هسته فیبر انتقال دهنده نور در فیبرهای انتقال باریکه، بسته به کاربردها متغیر است. هسته های معمول برای برش و سایر کاربردهای دقیق ۵۰ یا ۱۰۰ میکرونی هستند. هسته های ۴۰۰ یا ۶۰۰ میکرونی برای لحیم کاری و برخی از انواع جوشکاری مورد استفاده قرار میگیرند. فیبرهای ۶۰۰ میکرونی توانایی انتقال توانهایی در حد کیلووات را دارند. هسته های ۱۵۰۰ میکرونی برای کاربردهایی مانند سخت کاری و غلاف سازی فلزی به کار گرفته میشوند.

قابلیت توان بستگی به اندازه هسته دارد و کیفیت باریکه به اندازه هسته و گشودگی عددی وابسته است. فیبر ۲۰۰ میکرونی با NA ۰/۲ قادر به انتقال ۵۰۰ وات توان با BPP ۲۰ میلی متر-میلی رادیان است و فیبر ۴۰۰ میکرونی با NA ۰/۱ با کیفیت باریکه یکسان میتواند تا ۲ کیلووات تحویل داشته باشد.

انواع ترکیب کردن باریکه

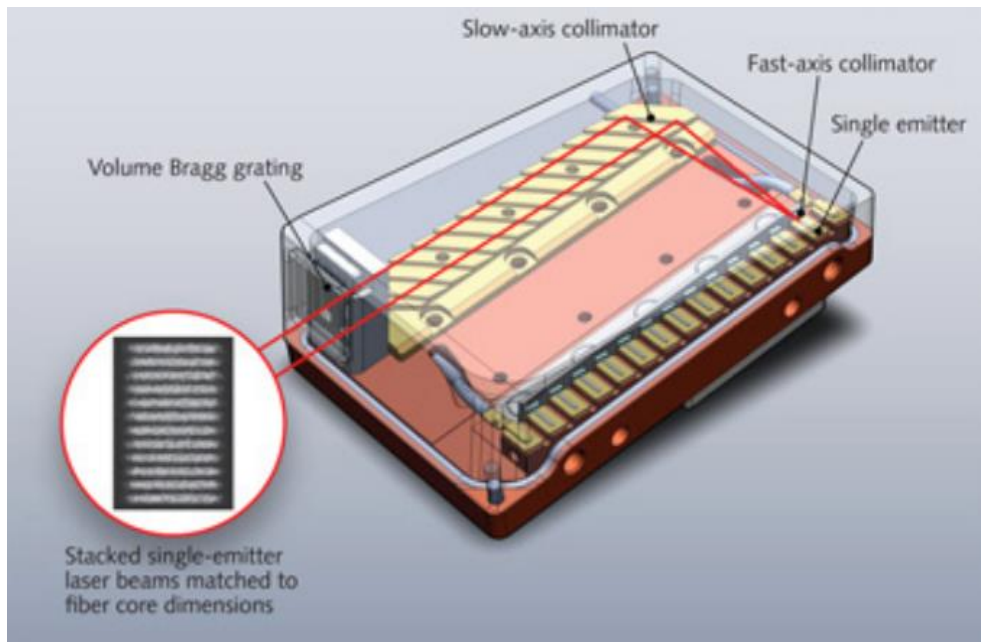
تکنیک های پیشرفته ترکیب باریکه می توانند سبب افزایش درخشندگی و توان کل شوند. خروجی دیود ذاتاً قطبیده است، بنابراین با ترکیب دو باریکه با قطبش متعام، توان می تواند دو برابر شود. به عنوان مثال توان ۸۰ واتی با ترکیب ۸ دیود گسیلنده ۱۰ تا ۱۲ وات در ۱۰۰ میکرومتر، فیبر NA ۰/۱۲ میتواند با اضافه کردن دومین دسته از ۸ گسیلنده مشابه با قطبش متعام، دو برابر شده و به ۱۶۰ وات برسد.

دو تکنیک دیگر میتوانند سبب افزایش بیشتر توان شوند. تکنیک ترکیب همدوس باریکه، که در آن چندین باریکه به هم اضافه میشوند در نتیجه فاز آنها با یکدیگر جمع میشود مانند زمانی که یک نوسانگر اصلی چندین تقویت کننده توان موازی را راه اندازی میکند. تکنیک ترکیب طول موجی باریکه، در این تکنیک باریکه هایی با چندین طول موج لیزر با اختلاف طول موجی که مانع از تداخل ویرانگر میان طول موج ها میشود، اضافه میشوند، مانند همافترگی تقسیم طول موج (WDM) در سیستم های فیبر-نوری.

ترکیب همدوس باریکه، کیفیت بالای باریکه و توان بالا را به دنبال دارد. با این حال اجرای آن دشوار است زیرا نیازمند کنترل فاز زیر-طول موجی، تطبیق طول مسیر و پهنای خط باریک لیزری است. ترکیب همدوس لیزرهای فیبری صدها وات توان تولید میکنند، اما نتایج مربوط به دیود به صورت قابل ملاحظه ای اندک است. دو سال پیش آزمایشگاه MIT Lincoln ترکیب همدوس خروجی ۲۱۸ تقویت کننده نیمه هادی موازی را به منظور تولید توان ۳۸/۵ وات گزارش کرد.

ترکیب طول موجی باریکه بسیار موفقتر بوده و به سطح توان کیلووات رسیده است. کمپانی TRUMPF از چهار لیزر با فاصله ۳۰ نانومتر با طول موج بین ۹۳۸ و ۱۰۳۰ نانومتر استفاده کرد تا به توان ۶ کیلووات در باریکه تزویج شده به فیبر با BPP ۲۰ تا ۳۰ میلی متر-میلی رادیان برای کاربردهای جوشکاری و لحیم کاری برسد.

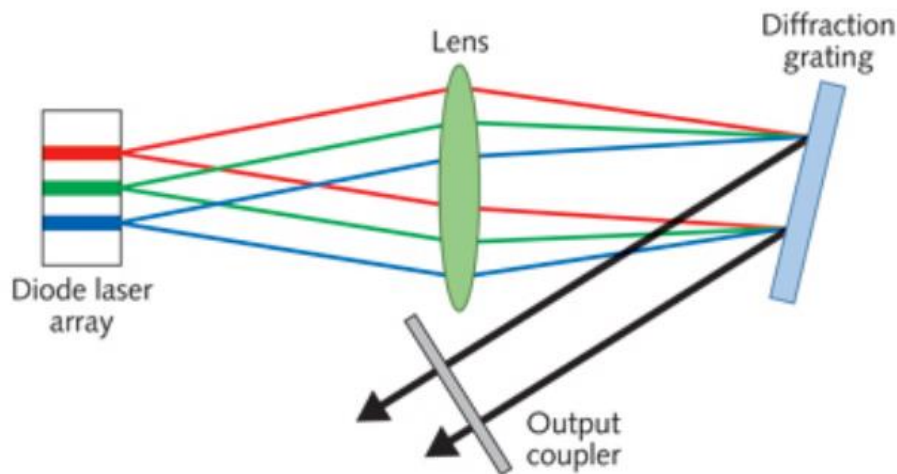
شرکت DirectPhotonics (برلین، آلمان) از یک ماژولاتور استفاده میکند که با یک ماژول که ۱۲ تابشگر منفرد را از نظر اپتیکی به یکدیگر متصل میکند، آغاز میشود. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، دیودها روی ۱۲ گام درون ماژول نصب شده اند. یک عدسی موازی ساز محور تند روی هر گسیلنده نصب شده است تا نور را در صفحه گام و روی یک آینه منحنی موازی ساز محور کند که متناظر با آن و در جهت مخالف روی گام نصب شده متمرکز کند. بازتابنده های روی گام باریکه ها را از هر یک از گسیلنده ها جمع کرده تا بتوانند در فیبر خروجی با هسته ۱۰۰ یا ۲۰۰ میکرونی متمرکز شوند. یک توری براگ حجمی همه دیودها را در یک طول موج در ماژول قفل میکند.



شکل ۲- ماژول ترکیب طول موجی باریکه با منابع تابشگر منفرد توسعه یافته توسط DirectPhotonics. در گوشه پایین سمت راست ۱۲ تابشگر منفرد روی گام‌ها قرار دارند. هر تابشگر یک عدسی موازی ساز محور تند در مقابل آن دارد، که باریکه را روی یک آینه منحنی موازی ساز محور کند در جهت مخالف (مرکز شکل قسمت بالا) متمرکز میکند. آینه منحنی، باریکه هر تابشگر را روی سطح متناظر در خروجی توری براگ حجمی متمرکز میکند. چینش نوری حاصل از تابشگرهای منفرد درون هسته فیبر خروجی در سمت چپ نشان داده شده است.

همتاقتگری چهار طول موج در فاصله ۲/۵ نانومتر با استفاده از آینه های دورنگی توان را افزایش داده و کیفیت باریکه را تا حد خوبی حفظ میکند. به گفته مارک ویپیچ یکی از بنیانگذاران Direct Photonics این شرکت سیستم‌هایی در کلاس کیلووات با توان‌های ۱ تا ۲ کیلووات با بازده ۳۰٪ ارائه کرده است. کیفیت BPP خروجی فیبر ۷/۵ میلی متر-میلی رادیان است که سیستم را برای برش فلزی مطلوب میسازد و در عین حال توسعه دهندگان به بهبود بیشتر کیفیت باریکه امیدوارند.

شرکت TeraDiode راهکار خود را دارد در این روش از آرایش کاواک بیرونی برای بار لیزر استفاده شده است تا یک توری پراش، یک عدسی مبدل و یک لنز خروجی، طول موج های مختلف در باند ۹۷۰ نانومتر از هر نوار را مطابق شکل (۳) انتخاب کنند. بار در سرتاسر بازه ۳۰ نانومتری تابش می کند. ماژول اصلی چند طول موجی از طریق فیبر ۵۰ میکرونی، توان ۵۰۰ وات تولید میکند، همچنین یک نسخه ۲ کیلوواتی گسیلی از فیبر ۱۰۰ میکرونی نیز ساخته شده است. به گفته TeraDiode مدولها میتوانند به یکدیگر متصل شوند تا توان ۶ کیلووات تولید شود.



شکل ۳- در ترکیب باریکه به روش TeraDiode از طول موج های نزدیک به هم از نوارهای یک بار لیزر دیود استفاده شده است. کل بار لیزر دارای باند بهره یکسانی است، اما کاواک بیرونی به گونه ای مرتب شده است که هر نوار در طول موج های مختلفی نوسان کند، در شکل به صورت شماتیک با قرمز، سبز و آبی نشان داده شده است. سپس این باریکه ها به صورت یک خروجی با یکدیگر ترکیب میشوند.

در سال ۲۰۱۲، دکتر پرویز طیبانی یکی از بنیانگذاران ترادیود به Laser Focus World اعلام کرد که نمونه ۳۶۰ وات برای DARPA با BPP، ۰/۶ میلی-متر-میلی رادیان نزدیک به لیزر فیبر تک مد ارائه شده است. هدف تجاری شرکت، BPP بین ۲ تا ۸ میلی-متر-میلی رادیان است که برای برش فلزات مناسب است. نمونه های اولیه به بازده ۴۶٪ رسیده اند.

چشم انداز

دیودهای کاربرد مستقیم به پیشرفت واقعی دست یافته اند، اما محدودیتهای واقعی باقی مانده است. موضوع اصلی سبک و سنگین کردن بین راندمان و کیفیت باریکه است. اپتیک ترکیب باریکه میتواند کیفیت باریکه را بهتر کند؛ اما در این فرآیند نور تلف شده و کاهش راندمان را به دنبال دارد.

به گفته تروش، افزایش راندمان نیاز به پیشرفتهای بیشتر دارد. هم اکنون در آزمایشگاه راندمانهای ۷۰٪ تا ۷۳٪ قابل دستیابی است، اما در عمل بین ۶۵٪ تا ۶۸٪ است و برای نور به شدت پایدار کمتر از ۶۰٪ است. به گفته او نمیتوان باریکه را موازی سازی کرد و تلفات نداشت. در نهایت اگر ما از یک تابشگر منفرد تا قطعه کار راندمان ۵۰٪ داشته باشیم خوشحال خواهیم بود، البته این باریکه ها نیز به شدت متمرکز نخواهند بود. به گفته او دستیابی به راندمان بیش از ۴۰٪ با ترکیب طول موج ها در ۲ تا ۳ کیلووات دشوار است.

این مقادیر بسیار نزدیک به لیزرهای فیبر و دیسک با بازده کل ۳۰٪ تا ۳۵٪ است که قادرند ۶۵٪ تا ۷۰٪ توان دمش دیودی را به باریکه ای با کیفیت بالاتر تبدیل کنند. آیا لیزر دیودهای کاربرد مستقیم قادر خواهند بود بر برتریهای محیط های بهره در تولید باریکه هایی با شدت های مورد نیاز برش فلزات غلبه کنند؟ سؤال خوبی است، این سؤال برانگیزاننده رقابت در عرصه فن آوری است که به خوبی ارزش دنبال کردن دارد.