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

تاثیر نحوه پمپاژ برآستانه اثر ناپایداری مدی در لیزرهای فیبری پرتوان

علی روح فروز*، رضا عینی چنار، سعید عزیزی، رضا رضایی نصیر آباد،
کامران حجاز، وحید وطنی، سید حسن نبوی
roohforouz@inlc.ir
مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

چکیده - در این مقاله ناپایداری مدی به عنوان یک محدودیت ذاتی برای افزایش توان خروجی لیزرهای پرتوان مورد بررسی قرار گرفته شده است و آستانه ناپایداری مدی در تشدیدگر ۳/۰۲ کیلو وات فیبری در حالت های مختلف پمپاژ از روبرو، پمپاژ از انتها و پمپاژ از دو طرف بررسی و مقایسه شده است. نتایج آزمایش های انجام شده نشان می دهد که آستانه ناپایداری مدی در حالت پمپاژ از دو طرف بالاتر از حالت پمپاژ از یک طرف (پمپاژ روبرو و انتها) است. همچنین بررسی های بیشتر نشان می دهد که آستانه ناپایداری مدی در حالت پمپاژ از روبرو بالاتر از حالت پمپاژ از انتها است. دلیل بالا رفتن آستانه ناپایداری مدی در حالت پمپاژ از دو طرف این است که پمپاژ از دو طرف باعث می شود که نمایانی توری ضریب شکستی ایجاد شده در اثر تداخل مد LP_{01} و LP_{11} کمتر شود.

کلید واژه- لیزرهای فیبری ، چیدمان پمپاژ، مدهای عرضی، ناپایداری مدی.

Pumping configuration effect on the transverse mode instability in high power fiber lasers

Ali Roohforouz, Reza Eyni Chenar, Saeed Azizi, Reza Rezaei-Nasirabad, Kamran Hejaz, Vahid Vatani, Seyed Hasan Nabavi

Iranian National Center for Laser Science and technology, Tehran, Iran.

Abstract- Transverse Mode Instability (TMI) as a substantial restriction for further power scaling of high-power fiber lasers has been investigated and its occurrence power threshold in a 3.02 kW level fiber oscillator has been compared in co-, counter- and bidirectional pumping schemes. Experimental results show that TMI power threshold in a bidirectional-pumping scheme is higher than that of co- and counter-pumping configurations. It is also observed that counter pumping method has higher TMI threshold than co-pumping scheme. The TMI threshold of bidirectional-pumping is higher than co/counter-pumping because the index gratings generated in the bidirectional-pumping scheme is smoother than that of co/counter-pumping configuration.

Keywords: Fiber lasers, Mode instability, Fiber oscillator, Transverse modes.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مقدمه

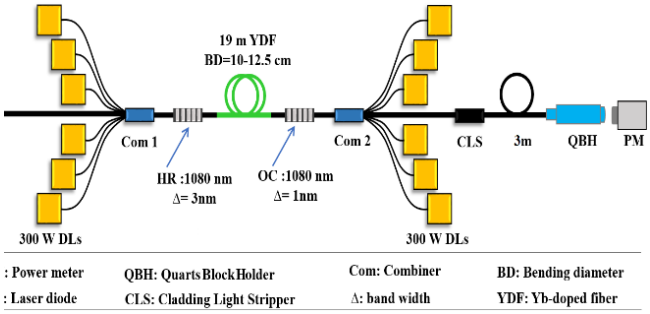
در یک دهه اخیر افزایش توان تشدیدگر و تقویت کننده فیبری بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به مزایای فراوان لیزر فیبر نوری از قبیل امکان رسیدن به توان خروجی بالا با حفظ کیفیت باریکه، بازدهی نوری بسیار خوب و خنکسازی آسان در صنعت و تحقیقات روی آن تمرکز شده است[۲-۱].

در سال ۲۰۱۲ شیائو و همکاران لیزر فیبربا توان خروجی یک کیلووات گزارش کردند[۳]. همچنین در سال ۲۰۱۴ یو و همکاران یک لیزر فیبری ۱,۵ کیلو وات با پمپاژ در طول موج ۹۱۵ نانومتر با استفاده از فیبر نوری با قطرمغزی ۲۰ میکرومتر را گزارش کردند[۴].

این کار از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول یک لیزر با چیدمان پمپاژ از انتها طراحی شد. در قسمت دوم به پمپاژ از دو طرف توسعه پیدا کرد. عملکرد لیزر در حالت پمپاژ از انتها با پمپاژ از روبرو بصورت تجربی بررسی و مقایسه شده است و اثر جهت پمپاژ و همچنین ترکیب دو نوع پمپاژ روی استانه اثر ناپایداری مدی در لیزرهای فیبری پرتوان بررسی شده است.

چیدمان آزمایشگاهی

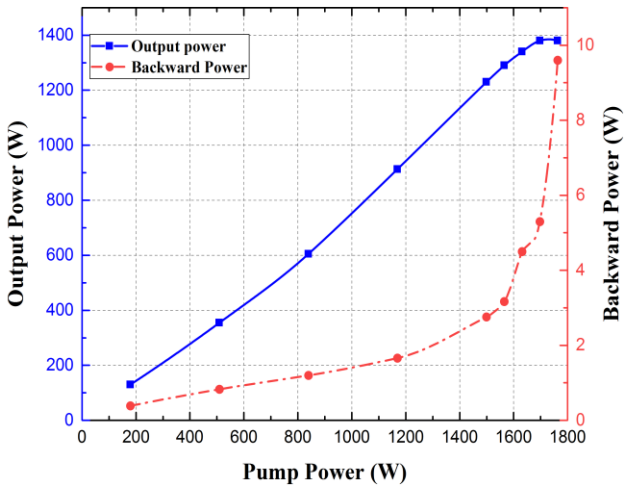
چیدمان تشدیدگر تمام فیبری ساخته شده در این کار در شکل ۱ نمایش داده شده است. تشدیدگر لیزر مورد نظر برای پمپاژ از دو طرف طراحی شده است. ۱۲ دیود ۳۰۰ وات با طول موج مرکزی ۹۷۶ نانومتر برای پمپ کردن لیزر مورد استفاده قرار گرفته شده است. فیبرنوری دو غلافی با ابعاد مغزی/غلاف ۴۰۰/۲۰ میکرومتر و طول ۱۹ متر به عنوان فیبرفعال استفاده شده است. توری براگ فیبری با بازتاب ۹۹٪ و پهنای طیفی ۳ نانومتر به عنوان آینه تمام بازتاب و توری براگ فیبری با بازتاب ۱۰٪ و پهنای طیفی ۱ نانومتر بعنوان آینه بازتاب پایین در طول موج مرکزی ۱۰۸۰ نانومتر در چیدمان لیزر استفاده شده است.



شکل ۱: چیدمان آزمایشگاهی لیزر ۳/۰۲ کیلو وات فیبری پمپاژ از دو طرف. در ابتدا چیدمان پمپاژ از انتها با استفاده از ۶ عدد دیود ۳۰۰ وات طراحی شد و در مرحله بعد پمپاژ از روبرو نیز توسط ۶ دیود ۳۰۰ وات دیگر به آن اضافه شد.

چیدمان پمپاژ از انتها

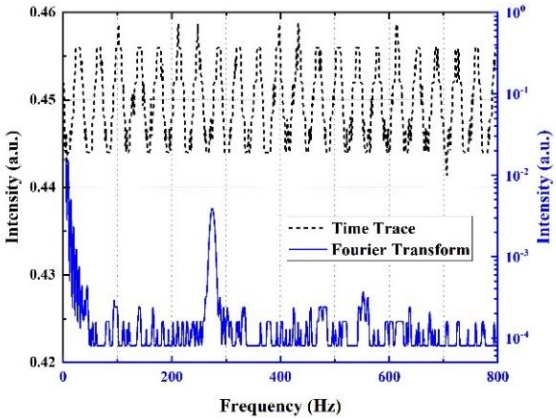
درشکل ۲ نمودار توان خروجی و نور برگشتی بر حسب توان پمپاژ رسم شده است. با توجه به نمودار توان خروجی در توان پمپاژ بیشتر از ۱۵۸۰ وات شیب نمودار توان خروجی برحسب توان پمپاژ بطور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا می کند. همچنین، نور برگشتی نیز افزایش زیادی نشان می دهد. کاهش قابل ملاحظه شیب نمودار توان خروجی به همراه افزایش شدید نور برگشتی نشان دهنده ظهور پدیده ناپایداری مدی است [۵].



شکل ۲: نمودار توان نور برگشتی (رنگ قرمز) و توان خروجی (رنگ آبی) بر حسب توان پمپ شده در حالت پمپاژ از انتها. افت توان خروجی در توان پمپاژ ۱۷۰۰ وات وجود ناپایداری مدی را نشان می دهد.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

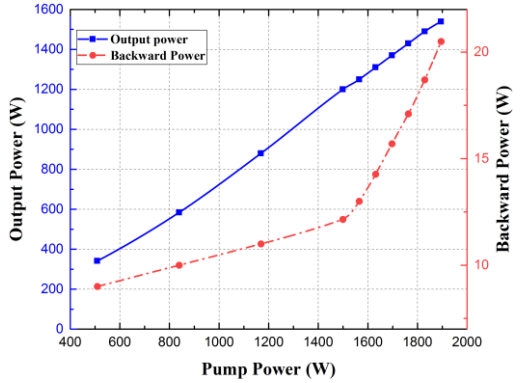


شکل ۳: تحول زمانی توان خروجی لیزر (رنگ آبی) در آستانه ناپایداری مدی در حالت پمپاژ از انتها و تبدیل فوریه آن (رنگ قرمز). با توجه به شکل توان خروجی لیزر در فرکانس ۲۶۰ هرتز در حال نوسان است.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است بعد از آستانه پمپاژ ۱۵۸۰ وات رفتار تناوبی در تابع تحول زمانی سیگنال مشاهده شده است. همچنین تبدیل فوریه آن نیز رسم شده است که فرکانس این نوسانات را نشان می دهد. اولین و دومین فرکانس قابل ملاحظه به ترتیب در ۲۶۰ و ۵۲۰ هرتز مشاهده شده است. با توجه به رفتار زمانی سیگنال می توان با قاطعیت گفت که دلیل رفتار غیر عادی در منحنی توان خروجی بر حسب توان پمپ، پدیده ناپایداری مدی است. به علت پدیدی ناپایداری مدی سهم مد LP11 در سیگنال درون کاواک افزایش می یابد و با توجه با اینکه ضریب بازتاب آینه تمام بازتاب برای مد LP11 کمتر است میزان عبور سیگنال از این آینه افزایش می یابد که منجر به افزایش شدید نور برگشتی می شود.

چیدمان پمپاژ از روبرو

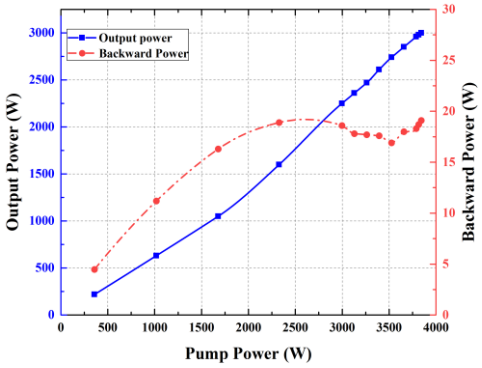
در چیدمان پمپاژ از روبرو توان خروجی و توان نور برگشتی اندازه گیری شده بر حسب توان پمپ شده در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش جریان دیود لیزرها توان خروجی و توان نور برگشتی رفتار عادی از خودشان نشان می دهند. توجه به این نکته ضروری است که با افزایش جریان، طول موج مرکزی دیود لیزرها نیز افزایش می یابد و به همین دلیل با افزایش توان پمپاژ، نور برگشتی رفتاری غیر خطی از خود نشان می دهد. در چیدمان پمپاژ از روبرو توانستیم به توان خروجی ۱۵۷۰ وات دست پیدا کنیم. در این توان خروجی هیچ اثری از ناپایداری مدی مشاهده نشد.



شکل ۴: نمودار توان نور برگشتی (رنگ قرمز) و توان خروجی (رنگ آبی) بر حسب توان پمپ شده در حالت پمپاژ از روبرو.

چیدمان پمپاژ از دو طرف

به منظور افزایش توان خروجی لیزر و بهبود آستانه پدیده ناپایداری مدی در تشدیدگر لیزر فیبری، چیدمان پمپاژ از روبرو و پمپاژ از انتها با هم ترکیب شدند و چیدمان پمپاژ از دو طرف را تشکیل دادند. شکل ۴ نمودار توان نور برگشتی و توان خروجی بر حسب توان پمپ شده در حالت پمپاژ از دو طرف را نشان می دهد. در چیدمان آزمایشگاهی دو طرف پمپ اثرات ناپایداری مدی به صورت کامل حذف شد و خروجی لیزر با کیفیت باریکه ۱/۲۹ در راستای x و ۱/۲۲ در راستای y به دست آمد که در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین طیف پرتو خروجی این لیزر نیز اندازه گیری شده است که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

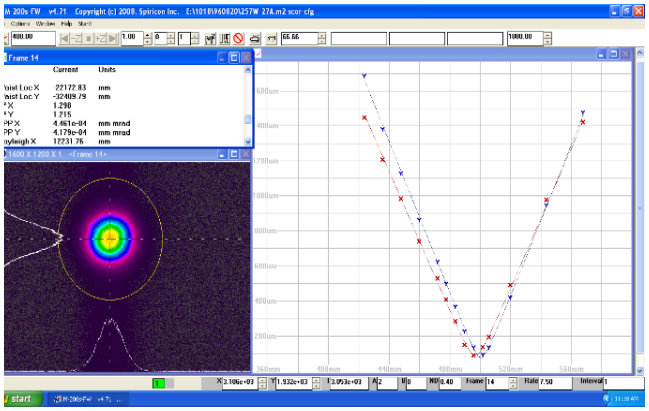


شکل ۴: نمودار توان نور برگشتی (رنگ قرمز) و توان خروجی (رنگ آبی) بر حسب توان پمپ شده در حالت پمپاژ از دو طرف. با توجه به شکل آستانه ناپایداری مدی در چیدمان پمپاژ از دو طرف در مقایسه با چیدمان پمپاژ از انتها و روبرو بالاتر است.

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

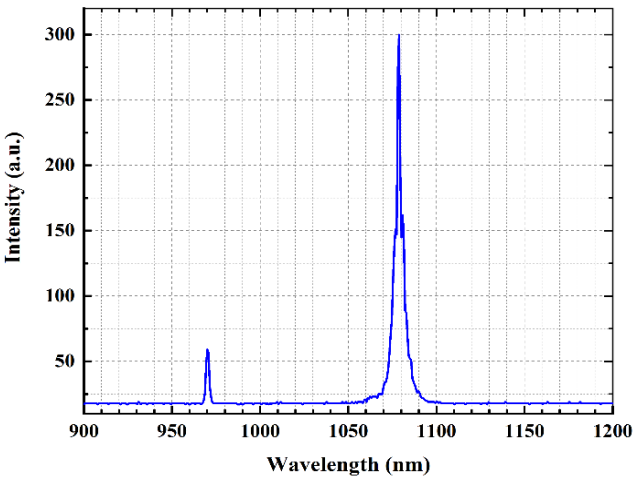
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

لسگارد [۶] نشان داد که سیگنال عبوری در دو جهت مخالف می توانند هر کدام بصورت جداگانه توری ضریب شکستی در مغزی فیبر ماده فعال ایجاد نمایند که می تواند بصورت متقابل روی سیگنال رفت و برگشتی اثر بگذارد.



شکل ۵: کیفیت باریکه لیزر در توان ۳/۰۲ کیلووات.

با توجه به این نظریه در حالت پمپاژ از دو طرف در ابتدا و انتهای ماده فعال در درون تشدیدگر توان پمپاژ زیادی وجود دارد که می تواند توری ضریب شکستی در مغزی فیبر ایجاد نماید و لذا مدهای LP_{01} و LP_{11} هر کدام مسیر نوری متفاوتی را در اثر عبور از این توری ها تجربه می کنند که باعث کاهش همدوسی بین این مدها و در نتیجه کاهش نمایانی توری ضریب شکستی شود و این اثر نیز باعث افزایش آستانه ناپایداری مدی در حالت پمپاژ از دو طرف می شود.



شکل ۵: طیف پرتو خروجی لیزر در توان ۳/۰۲ کیلووات. پهنای طیفی در حدود ۵ نانومتر اندازه گیری شده است.

نتیجه‌گیری

در این کار نشان داد شده است که چیدمان پمپاژ می تواند اثر قابل ملاحظه ای درآستانه اثر ناپایداری مدی در لیزرهای فیبری پرتوان داشته باشد. در ابتدا مشاهده شد که چیدمان پمپاژ از روبرو نسبت به چیدمان پمپاژ از انتها از نظر ناپایداری مدی و بازده نوری عملکرد بهتری نشان داد. همچنین نشان داده شده است که با استفاده از چیدمان پمپاژ از دو طرف می توان آستانه ناپایداری مدی را تا ۳/۰۲ کیلو وات افزایش داد.

مراجع

[1] X. Du, H. Zhang, P. Ma, H. Xiao, X. Wang, P. Zhou, Z. Liu, "Kilowatt-level fiber amplifier with spectral-broadening-free property, seeded by a random fiber laser" Optics letters, Vol. 40, No. 22, pp. 5311-5314, 2015.

[2] Q. Fang, W. Shi, Y. Qin, X. Meng, Q. Zhang, "2.5 kW monolithic continuous wave (CW) near diffraction-limited fiber laser at 1080 nm" Laser Physics Letters, Vol. 11, No. 10, pp. 105102, 2014.

[3] Y. Xiao, F. Brunet, M. Kanskar, M. Faucher, A. Wetter, N. Holehouse, "1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks", Optics express, Vol. 20, No. 3, pp. 3296-3301, 2012.

[4] H. Yu, X. Wang, R. Tao, P. Zhou, J. Chen, "1.5 kW, near-diffraction-limited, high-efficiency, single-end-pumped all-fiber-integrated laser oscillator" Applied optics, Vol. 53, No. 34, pp.8055-8059, 2014.

[5] K. Hejaz, A. Norouzey, R. Poozesh, A. Heidariazar, A. Roohforouz, R. Rezaei Nasirabad, N. Tabatabaei Jafari, A. Hamedani Golshan, A. Babazadeh, M. Lafouti. "Controlling mode instability in a 500 W ytterbium-doped fiber laser" Laser Physics, Vol. 24, No. 2, pp.025102, 2014.

[6] J. Laegsgaard, "Static thermo-optic instability in double-pass fiber amplifiers" Opt. Express, Vol. 24, No. 12, pp.1342913443, 2016.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]