

بررسی اثر دما بر عملکرد لیزرهای فیبری

مریم ایلچی^۱، پرویز پروین^۲، امین بابازاده^۳، احمد کامکار^۴

چکیده: در این مقاله، به بررسی تجربی اثر خنک‌سازی محیط بهره بر عملکرد لیزر فیبری و پارامترهای مختلف آن شامل توان خروجی، بازده، طول موج مرکزی و نیز پهنای باند طیفی پرداخته شده است. سامانه همدوس به کار گرفته شده، یک لیزر فیبری دوغلافی Yb:silica موج پیوسته تک مد با بیشینه توان خروجی ۱۰ W است که باریکه خروجی در قله ۱۰۸۲/۵۱ nm با پهنای طیفی ۱/۷ nm در دمای محیط را داراست. به منظور خنک‌سازی لیزر، محیط بهره فعال را به سهولت در یک ماده خنک‌کننده غوطه‌ور می‌کنیم. آزمایش‌ها در دمای اتاق (۲۲/۵ °C) اجرا شده و نتایج آن با داده‌های حاصله از مخلوط سرماساز اتیلن گلیکول-یخ خشک (DIEG) در دمای ۲۹ °C-، یخ خشک ساچمه‌ای (۵۸ °C-) و نیتروژن مایع (LN) در دمای ۱۸۹/۲ °C- در جریان‌های دما متفاوت از ۱۰ A تا ۴۰ A مورد مقایسه قرار داده شده است. به این ترتیب، دستیابی به یک لیزر چند طول موجی با پهنای باند باریک، توسط لیزرهای فیبری کرایوژنیک امکان‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی: خنک‌سازی لیزر فیبری، برداشت گرما، لیزرهای کرایوژنیک، مخلوط اتیلن گلیکول-یخ خشک، یخ خشک ساچمه‌ای، نیتروژن مایع.

که این مسئله به افزایش بازده تا بیش از ۸۰٪ منجر می‌شود و یکی از پارامترهای اساسی در میزان گرمای تولیدشده [۳] است.

لیزرهای فیبری به دلیل دارا بودن ساختار هندسی خاص (بزرگ بودن نسبت سطح به حجم فیبر)، در توان‌های پایین نیاز چندانی به خنک‌سازی ندارند؛ اما افزایش دما در توان‌های بالا، اثرات مخربی همچون خود پالس زنی و عدسی شدن حرارتی [۴-۶] و یا استرس‌های ایجاد شده توسط پدیده دوشکستی را به دنبال دارد. همچنین، ویژگی‌های طیفی مواد میزبان از جنس شیشه‌های آمورف، به شدت تحت تأثیر دما [۷] قرار دارند؛ بنابراین، بدیهی است که باید از روش‌های گونه‌گون خنک‌سازی فعال و منفعل [۸-۱۱] به منظور برداشت گرمای اضافی استفاده کرد. در این میان، نیاز به لیزرهای فیبری تبریدی [۱۲] که در آن‌ها، محیط بهره در دماهای کرایوژنیک قرار دارد، در اولویت است. فراهم‌سازی

۱. مقدمه

لیزرهای فیبری توان بالا به‌استثنای چند مورد خاص بیشتر از نوع فیبرهای دوغلافی آلاییده به فلزات خاکی نادر در بستر سیلیکا هستند که توسط چشمه‌های دیودی چند مدی دمیده می‌شوند. در بین آلاینده‌های مختلف، معمولاً ایتربیم (Yb) به دلیل ویژگی‌هایی چون بالا بودن طول عمر تراز تحریکی، حل‌پذیری خوب در سیلیکا، سادگی ساختار ترازهای انرژی و نیز پهن بودن طیف جذب حتی در دماهای کرایوژنیک [۱]، اولین گزینه در محدوده توان‌های بالاست. به‌ویژه، نقص کوانتومی بین طول‌موج‌های دما و لیزر [۲] در آن بسیار اندک است

(۱) استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک.

m.eilchi99@gmail.com

(۲) استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک.

parvin@aut.ac.ir

(۳) کارشناس، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

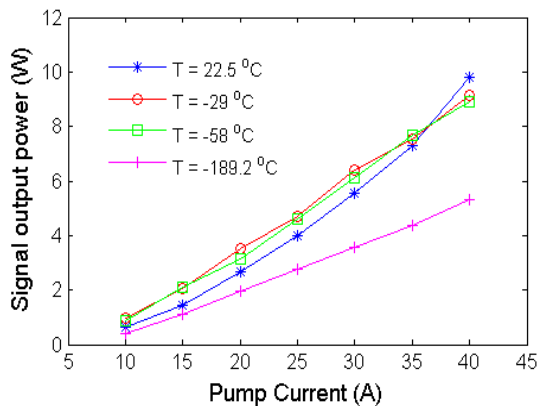
(۴) کارشناس، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

اندازه‌گیری‌های تجربی در چهار دمای متفاوت شامل دمای محیط (22.5°C)، دمای مخلوط خنک‌ساز DIEG (-29°C)، یخ خشک (-58°C) و LN (-189.2°C) اجرا شده است. ترکیب DIEG [۱۴-۱۵]، یک حمام تبریدی با ظرفیت خنک‌سازی بالا را ایجاد می‌کند که قادر است تعادل گرمایی را تا مدت زیادی حفظ نماید. این ترکیب، در واقع یک ژل در حال قلیان است که بسته به میزان بارگذاری یخ خشک، می‌توان دمای آن را از دمای محیط (22.5°C) تا -30°C تغییر [۱۶] داد.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

ابتدا، اثر دما بر خروجی لیزر را مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این منظور، با تغییر جریان دمش ورودی از 10 A تا 40 A ، تغییرات توان‌های خروجی لیزر را اندازه‌گیری می‌کنیم.

بر اساس داده‌های شکل ۲، کاهش دما از دمای محیط تا دمای یخ خشک، بازده لیزر را از 30% تنها به میزان اندکی تغییر می‌دهد اما با کاهش بیشتر دما تا دمای LN، بازده به 18% رسیده و با افت روبرو خواهد بود. دلیل این امر را می‌توان در وابستگی غیرخطی سطح مقطع‌های جذب و گسیل و نیز طول عمر فلوتورسانس آن با دما دانست. به این ترتیب، با کاهش نرخ گسیل القایی، بهره ($\gamma = \Gamma_s[\sigma_{es}N_2 - \sigma_{as}N_1]$) و در پی آن بازده لیزر با افت همراه خواهد بود. به علاوه، در این شرایط نقص کوانتومی افزایش پیدا می‌کند که به پیدایش اثر خودپالس‌زنی منجر شده و بازده را کاهش می‌دهد.

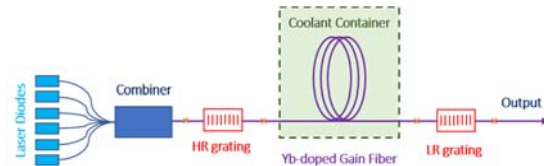


دماهای پایین به کمک گازهای آبی^۵ مانند آمونیاک (240 K)، گاز کربنیک مایع (195 K)، متان (111 K)، LN (77 K)، نئون مایع (27 K) و هلیوم مایع (4 K) امکان‌پذیر است. خنک‌سازی، سبب کاهش ضریب بسط گرمایی و ضریب ترموپاتیک، گرادیان دما [۱۳] و پهن‌شدگی ناشی از گرما می‌شود.

در این مقاله نشان می‌دهیم هرچند که در توان‌های پایین نیاز چندانی به خنک‌سازی لیزرهای فیبری نیست، اما به‌کارگیری روش‌های خنک‌سازی مناسب، تأثیر بسزایی بر عملکرد و پارامترهای مختلف لیزر خواهد گذاشت.

۲. چیدمان تجربی

در این آزمایش، از یک لیزر فیبری Yb:silica دوغلافی موج پیوسته با بیشینه توان خروجی 10 W استفاده کردیم که باریکه سیگنال خروجی لیزر در قله 1082.51 nm با پهنای طیفی 1.7 nm در دمای محیط (22.5°C) را داراست. به‌منظور خنک‌سازی لیزر، همانند شکل ۱، محیط بهره را به سهولت در یک ماده خنک‌کننده غوطه‌ور می‌کنیم. به این ترتیب، با خنک‌سازی فیبرهای آلاینده به Yb تا دماهای کرایوژنیک، جمعیت گرمایی ترازهای پایین لیزری به‌شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۱: شمای چیدمان تجربی سامانه لیزر فیبری تحت خنک‌سازی محیط بهره

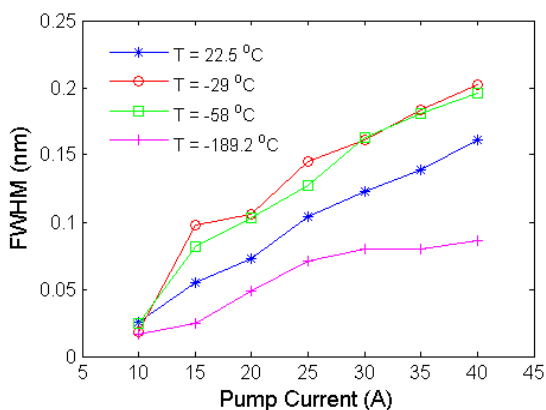
منبع دمش، یک لیزر دیودی در طول موج 976 nm است که قابلیت تغییر جریان از 10 A تا 40 A را داراست. همچنین، محیط بهره لیزر به طول 10 m از یک فیبر دوغلافی تک مد آلاینده به Yb با قطر هسته (غلاف) $6\text{ }\mu\text{m}$ ($125\text{ }\mu\text{m}$) ساخته شده است.

^۵ liquefied gases

کوچک، تفاوت چندانی میان عملکرد لیزر در دمای محیط با لیزرهای کرایوژنیک نیست.

به طور کلی، دستیابی به یک لیزر فیبری با پهنای باند باریک و توان خروجی بالا با خنک‌سازی محیط بهره تا دماهای کرایوژنیک در توان‌های دمش بزرگ‌تر امکان‌پذیر است.

دلیل این امر را می‌توان در تأثیر دما بر پهن‌شدگی طیف بهره جستجو کرد. در لیزر فیبری آلاییده به Yb در بستر سیلیکا، پهن‌شدگی غالب در دمای اتاق همگن است اما مقدار این پهنای در لیزرهای کرایوژنیک کاهش می‌یابد. با خنک‌سازی مؤثر محیط بهره تا دماهای LN، نوسانات گرمایی و در پی آن جمعیت گرمایی کاهش می‌یابد و در نتیجه آن، تلفات بازجذب در طول موج سیگنال برای زیرلایه بالایی استارک کم می‌شود. لذا، پهن‌شدگی گرمایی ترازها در دماهای کرایوژنیک کمینه خواهد بود.



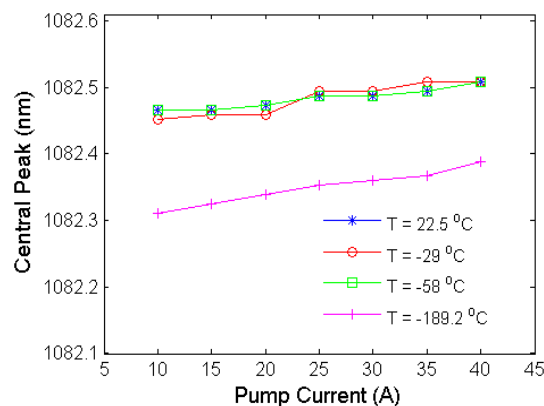
شکل ۴: تغییرات پهنای باند لیزر برحسب جریان‌های دمش در دماهای متفاوت

شکل ۵، طیف فلورسانس لیزر در ۴ دمای مختلف با جریان دمش ۴۰ A را نشان می‌دهد. نمودارها حاکی از آن هستند که در دماهای اتاق، یخ خشک و دمای ترکیب سرماساز DIEG، لیزر در طول موج مرکزی ۱۰۸۲٫۵۱ nm نوسان می‌کند. در مقابل، در دمای LN، قله اصلی لیزر به سمت طول موج کوتاه‌تر ۱۰۸۲٫۳۹ nm سوق پیدا می‌کند.

شکل ۲: تغییرات توان خروجی لیزر برحسب جریان دمش در دماهای متفاوت

اشاره به این نکته جالب توجه است که لیزر فیبری Yb:silica در دمای محیط به صورت یک سیستم شبه سه تراز با دو زیر لایه به فاصله جدایی 8750 cm^{-1} در نظر گرفته می‌شود حال آنکه، در دماهای کرایوژنیک به صورت یک لیزر چهارترازی عمل می‌کند.

از سوی دیگر، طول موج قله مرکزی و پهنای باند لیزر نیز در همان شرایط قبلی ذکر شده توسط طیف نگار اندازه‌گیری شد. مطابق شکل ۳، با کاهش دمای کاری تا دمای 58°C ، طول موج قله مرکزی (1082.51 nm) تغییرات چندانی ندارد اما خنک‌سازی کرایوژنیک محیط بهره تا دمای 189.2°C ، قله لیزر را 0.12 nm جابجا می‌کند. به ویژه، با افزایش توان دمش، شاهد افزایش تدریجی قله مرکزی لیزر خواهیم بود که در تمامی شرایط دمایی مختلف برقرار و تقریباً یکسان است.

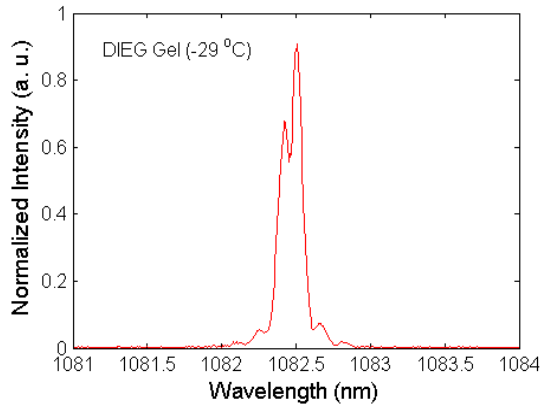


شکل ۳: تغییرات قله مرکزی لیزر برحسب جریان دمش در دماهای متفاوت

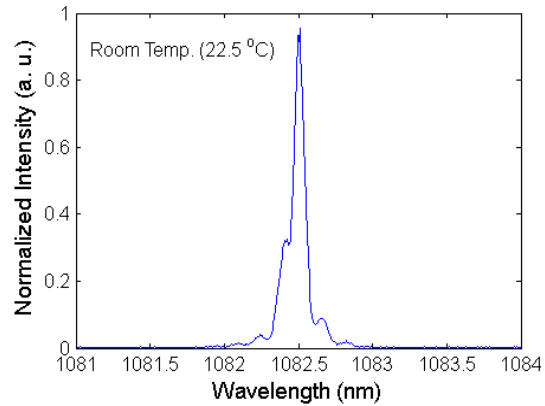
از نقطه نظر FWHM^{f} همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، کاهش دمای کاری سیستم تا 58°C ، مقدار FWHM سیگنال را افزایش می‌دهد در حالی که، در دماهای پایین‌تر، این روند کاملاً معکوس می‌شود. به ویژه، این تغییرات کاملاً تابع مقدار توان دمش بوده و در جریان‌های دمش پایین (۱۰ A) نزدیک به رژیم سیگنال

^f Full width at half maximum

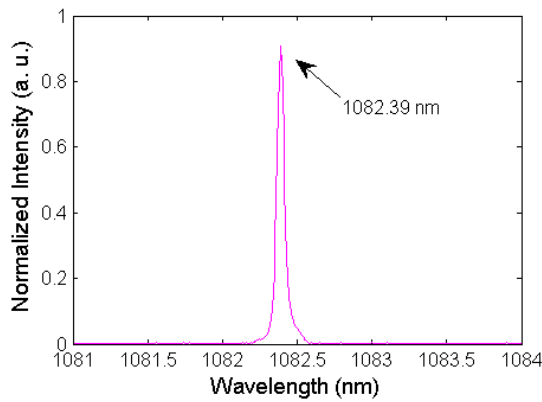
به ویژه، در شرایطی که محیط بهره در معرض دمای



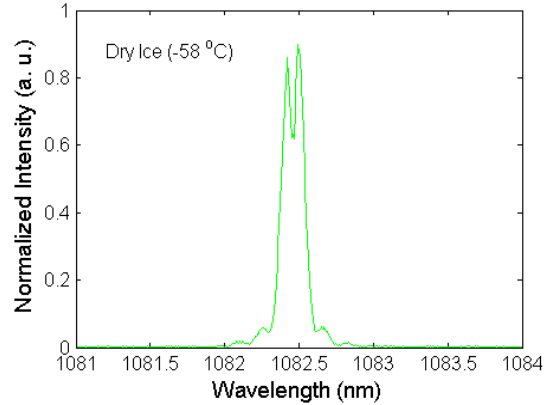
(ب)



(الف)

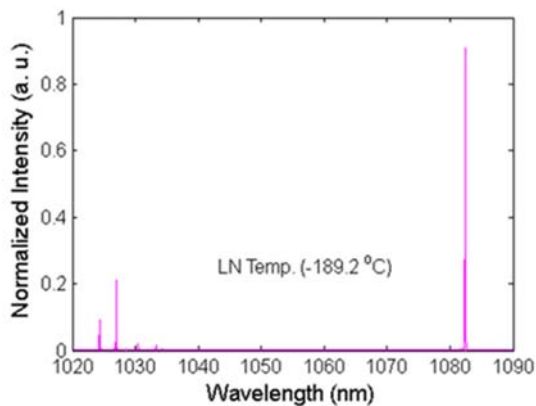


(د)



(ج)

شکل ۵: طیف فلورسانس لیزر در (الف) دمای اتاق، (ب) ترکیب DIEG، (ج) یخ خشک و (د) LN با جریان دمش A ۴۰

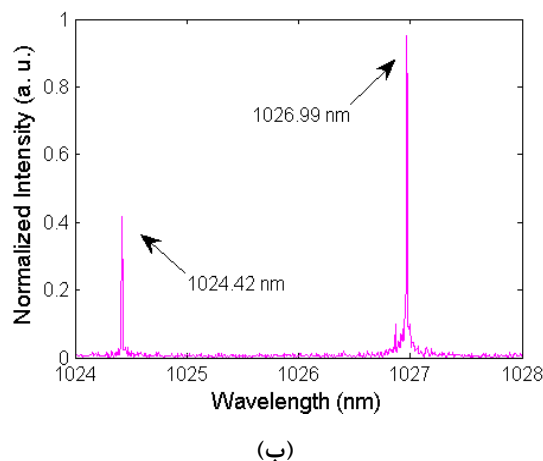


(الف)

کرایوژنیک -189.2°C قرار می‌گیرد، تعداد خطوط نوسانی مطابق شکل ۶ به سه طول موج متمایز افزایش می‌یابد. به این ترتیب، علاوه بر قله اصلی لیزر، باندهای کناری در دو طول موج 1024.42 nm و 1026.99 nm با فاصله جدایی 2.57 nm نیز ظاهر می‌شوند.

مرجع‌ها

- [۱] Fan Y., Roshan D. J., Aggarwal L., Ochoa J. R., Chann B., Tilleman M., Spitzberg J., *Cryogenic Yb³⁺-Doped Solid-State Lasers*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 13, No. 3, 2007, pp. 448–459.
- [۲] Jeong Y., Vazquez-Zuniga L.A., Lee S.J., Choi G., Kwon Y., Kim Y., *High-Power Fiber Lasers*, IEEE 17th Opto-Electronics and Communications Conference. Busan, South Korea. NY, USA: IEEE., 2012, pp. 580–581.
- [۳] Jeong Y., Nilsson J., Sahu J.K., Dupriez P., Codemard C.A., Soh D.B.S., Farrell C., Kim J., Richardson D.J., Payne D.N., *High Power Fiber Lasers*, In: CLEO/Pacific Rim, Optical Fiber Communication Conference; NY, USA: IEEE, 2005, pp. 1056–1058.
- [۴] Jelger P., Seger K., Pasiskevicius V., Laurell F., *Highly efficient temporally stable narrow linewidth cryogenically cooled Yb-fiber laser*, Opt. Exp., Vol. 17, No. 10, 2009, pp. 8433–8438.
- [۵] Rothenberg J.E., Brosnan S.J., Epp P.T., *High efficiency, high power cryogenic laser system*, US Patent, Patent, No.: Us 7,466,731 B2, Dec. 2008.
- [۶] Jelger P., *High performance fiber lasers with spectral, thermal and lifetime control*, PhD thesis, 2009.
- [۷] Newell T.C., Peterson P., Gavrielides A., Sharma M.P., *Temperature effects on the emission properties of Yb-doped optical fibers*, Opt. Commun. Vol. 273, 2007, pp. 256–259.
- [۸] Ashoori V., Malakzadeh A., *Explicit exact three-dimensional analytical temperature distribution in passively and actively cooled high-power fibre lasers*, J. Phys. D. Appl. Phys. Vol. 44, No. 35, 2011, pp. 1–6.
- [۹] Bowman S.R., O'Connor S.P., Biswal S., Condon N.J., Rosenberg A., *Minimizing Heat Generation in Solid-State Lasers*, IEEE J. Quantum. Elect. Vol. 46, No. 7, 2010, pp. 1076–1085.



شکل ۶: الف) طیف فلوروسانس لیزر در دمای LN و ب) باندهای کناری در جریان دمش ۴۰ A

همچنین، قله مرکزی در این حالت در ۱۰۸۲/۳۹ nm دیده می‌شود که نشان‌دهنده ۰/۱۲ nm جابه‌جایی آبی^۷ است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر دما بر عملکرد لیزر فیبری دوغلافی Yb در بستر سیلیکا پرداخته شده است. به این منظور، پارامترهای اصلی لیزر شامل توان خروجی، بازده و ویژگی‌های طیفی در رژیم موج پیوسته در دماهای DIEG، یخ‌خشک و LN اندازه‌گیری شده و نتایج آن با داده‌های سامانه لیزری در دمای محیط مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش دما، پارامترهای لیزر به صورت غیرخطی تغییر می‌کنند که این رفتار ناشی از تغییرات غیرخطی سطح مقطع‌های جذب و گسیل و به دنبال آن بهره لیزر با دماست. به علاوه، در دماهای پایین، پهن‌شدگی ناهمگن در لیزر فیبری کرایونیک چهارترازی غالب است که سبب کاهش پهنای باند طیفی لیزر خواهد بود. از سوی دیگر، کاهش جمعیت گرمایی و تلفات باز جذب، به جابه‌جایی قله اصلی لیزر به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر و افزایش قله‌های نوسانی منجر خواهد شد.

^۷ Blue shift

- liquid nitrogen*, In: Lasers and Electro-Optics – CLEO, Pacific Rim, 2007, pp. 1–2.
- [۱۴] Parvin P., Ilchi M., *Modified Dry Ice Heat Exchanger for Heat Removal of Portable Nuclear Reactors*, Non Provisional US Patent. Filing Date: 05/14/2012, Application No. US 13/470,547.
- [۱۵] Ilchi M., Parvin P., *Characterization of a Dry Ice Heat Exchanger*; International Journal of Refrigeration, Vol. 34, No. 3, 2011, pp. 1085–1097.
- [۱۶] Lee D.W., Jensen C.M., *Dry-Ice Bath Based on Ethylene Glycol Mixtures*, Journal of Chemical Education, Vol. 77, No. 5, 2000, pp. 629.
- [۱۰] Bowman SR, *Lasers without Internal Heat Generation*, IEEE J. Quantum. Elect. Vol. 35, No. 1, 1999, pp. 115–122.
- [۱۱] Ueda K., *High Power Fiber Lasers*, In: CLEO/ Pacific Rim 4th Conference of Lasers and Electro-Optics; Chiba, Japan. NY, USA: IEEE, 2001, pp. 486–487.
- [۱۲] Steinborn R., Koglbauer A., Bachor P., Diehl T., Kolbe D., Stappel M., Walz J., *A continuous wave 10 W cryogenic fiber amplifier at 1015 nm and frequency quadrupling to 254 nm*, Optics Express, Vol. 21, No. 19, 2013, pp. 22693–22698.
- [۱۳] Sumimura K., Yoshida H., Okada H., Fujita H., Nakatsuka M., *Suppression of self pulsing in Yb-doped fiber lasers with cooling by*

Influence of Temperature on Fiber Laser Performance

M. Eilchi, P. Parvin, A. Babazadeh and A. Kamkar

Abstract: This article is focused on the impact of cooling of gain medium on fiber laser operation and its characteristics such as output signal power, efficiency, central peak wavelength and, spectrum bandwidth (FWHM). The coherent source is a continuous-wave fiber laser, operating at 1082.51 nm, having 10 W maximum output power as well as 1.7 nm bandwidth with specialty dual-clad, single-mode fiber doped with ytterbium (Yb) in silica. In order to cool the laser, the active medium is easily immersed in a cooling medium. A series of experiments is carried out at ambient temperature (22.5 °C), compared with data obtained for dry ice-ethylene glycol (DIEG) cryogen (-29 °C), dry-ice debris (-58 °C) as well as liquid nitrogen (LN) coolant (-189.2 °C) at the pump current range from 10 A to 40 A. Thus, it is possible to achieve a narrow band multi-wavelength laser using cryogenic fiber lasers.

Keywords: Fiber laser cooling, Heat removal, Cryogenic lasers, Dry ice-ethylene glycol mixture, Dry-ice debris, Liquid nitrogen coolant.