



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



## طراحی و ساخت لیزر فیبری با توان ۵۰۰ وات و پهنای طیفی باریک

امیر حیدری آذر<sup>۱</sup>، سید محمد میرزا باقر برزی<sup>۲</sup>، رضا پوزش<sup>۲</sup>، وحید وطنی<sup>۲</sup>، حمید لطیفی<sup>۱</sup>

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

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

چکیده - در این مقاله یک لیزر ۵۰۰W وات تمام فیبری با پهنای طیفی باریک و طول موج ۱۰۷۹nm طراحی و ساخته شده است. چیدمان نوسانگر-تقویت کننده برای این منظور مورد استفاده قرار گرفت. از فیبرهای دو غلافه سیلیکایی با ناخالصی ایتربوم به عنوان محیط فعال استفاده شده است. بازده اپتیکی تقویت کننده ۶۹٪ می باشد. پهنای طیفی لیزر خروجی از نوسانگر و تقویت کننده به ترتیب ۰/۰۵nm و ۰/۰۹nm است. این مقاله همچنین در مورد اثر پهنای طیفی آینه فیبری بازتاب پایین لیزر و طول فیبر مورد استفاده در وقوع پراکندگی القایی بریلوین بحث می کند. لیزر ساخته شده از نظر توان و طیف بسیار پایدار بوده و به سبب خمش مناسب در فیبر خروجی، تک مد عرضی است.

کلید واژه- نوسانگر، تقویت کننده، پهنای طیفی، پراکندگی القایی بریلوین

## Design and construction of 500W fiber laser with narrow linewidth

Amir Heidariazar<sup>1,2</sup>, Seyed Mohammad Mirzabagher Barzi<sup>2</sup>, Reza Poozesh<sup>2</sup>, Vahid Vatani<sup>2</sup>,  
Hamid Latifi<sup>1</sup>

1. Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Iranian National Center for Laser Science and Technology, Tehran, Iran

**Abstract-** In this paper a 500W all-fiber narrow linewidth laser at 1079nm is designed and constructed. Seed-amplifier setup was used for this purpose. Yb<sup>+3</sup> doped double clad fiber was used as active medium. The optical efficiency for amplifier is 69%. Laser linewidth of oscillator and amplifier is 0.05nm and 0.09nm respectively. This paper also discusses the impact of output coupler mirror linewidth and fiber length on the SBS threshold. The spectrum and power of laser is stable and due to appropriate fiber bending the output beam is single mode.

**Keywords:** Amplifier, Oscillator, Linewidth, Stimulated Brillouin Scattering

## مقدمه

نور لیزر خود به عنوان پمپ عمل نموده و فرایند گسیل القایی موجب تقویت باریکه پراکنده شده می‌شود. تقویت باریکه بریلوین، علاوه بر آن که بازدهی لیزر را کاهش می‌دهد، می‌تواند منجر به سوختن آن شود. خاطر نشان می‌شود دیوهای پمپ به نور برگشتی، حساس هستند.

آستانه وقوع این پدیده غیرخطی به سطح مقطع مغزی فیبر  $A_{eff}$ ، ضریب بهره بریلوین  $g_B(\Delta\omega_P)$  و طول موثر فیبر  $L_{eff}$  بستگی دارد. این وابستگی در روابط (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است.

$$P_{th}^{SBS} = \frac{21A_{eff}}{g_B(\Delta\omega_P)L_{eff}} \quad (1)$$

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha l}}{\alpha} \quad (2)$$

$$g_B(\Delta\omega_P) = g_B(1 + \frac{\Delta\omega_P}{\Gamma_P})^{-1} \quad (3)$$

که در آن  $l$  طول فیبر،  $\alpha$  ضریب جذب مغزی فیبر و  $\Gamma_P$  طول عمر فونون آکوستیکی می‌باشد. هر چه طیف لیزر باریک‌تر، طول فیبر بلندتر و یا مقطع فیبر باریک‌تر باشد، آستانه وقوع SBS پایین‌تر می‌آید. اگرچه کاهش طول فیبر، خطر وقوع SBS را کمتر می‌کند، اما موجب می‌شود محیط بهره کوچکتری در اختیار داشته باشیم که این امر باعث می‌شود، نور پمپ به نحو مطلوبی در محیط فعال جذب نشود و بازدهی لیزر پایین بیاید؛ لذا طول بهینه‌ای برای ساخت لیزر مورد نیاز است. افزایش قطر فیبر نیز متأسفانه موجب چند مدی شدن لیزر می‌شود.

## روش انجام آزمایش

برای رسیدن به هدف مورد نظر، دو راهکار پیش رو بود: یکی استفاده از سیستم تک نوسانگر و دیگری بهره‌گیری از چیدمان نوسانگر-تقویت‌کننده. سیستم تک نوسانگر حتی به فرض انتخاب پهنای طیفی باریک توری‌های براگ فیبری

در سال‌های اخیر لیزرهای فیبری با ناخالصی ایتربیوم به سبب امکان رسیدن به توان‌های بالا، کیفیت باریکه عالی، خنک‌سازی آسان و بازده اپتیکی بالا، مورد توجه فراوانی قرار گرفته‌اند [۱ و ۲]. استفاده‌ای که از این لیزرها در صنعت به منظور برش یا جوش می‌شود، وابسته به پهنای طیفی لیزر خروجی نیست، اما برخی از کاربردهای مهم نیاز به لیزری با پهنای طیفی باریک دارند. این در حالی است که افزایش توان لیزرهای با پهنای طیفی باریک به دلیل وقوع پراکندگی القایی بریلوین ( $SBS^1$ ) دارای چالش زیادی می‌باشد. ترکیب طیفی باریکه‌های لیزر به منظور افزایش توان، نیاز به ساخت لیزرهایی با پهنای طیفی باریک دارد [۳ و ۴].

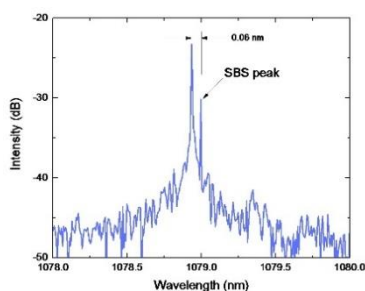
در این مقاله به دنبال آن هستیم تا با انتخاب بهینه طول و قطر فیبر، حلقه کردن مناسب فیبر، انتخاب لیزرهای دیودی مناسب و استفاده از توری‌های براگ فیبری با پهنای طیفی باریک، بتوانیم به بیشترین توان و کمترین پهنای طیفی ممکن برسیم.

## تئوری

مهمترین اثر غیرخطی که در لیزرهای فیبری با پهنای طیفی باریک، مانع از افزایش توان می‌شود، SBS می‌باشد. این اثر به علت برهم‌کنش نور لیزر فرودی با مدهای ارتعاشی سیلیکا است. فوتون‌های لیزر از فونون‌های آکوستیکی به طور غیرالاستیک پراکنده شده و انرژی فوتون جدید ایجاد شده معادل تفاضل انرژی فوتون فرودی و فونون است. در واقع این موج آکوستیکی ضریب شکست مغزی فیبر را مدوله کرده و با تشکیل یک توری پراش، موج فرودی را در خلاف جهت لیزر پراکنده می‌کند.

<sup>1</sup> Stimulated Brillouin Scattering

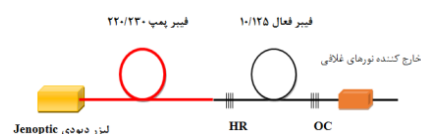
از دستگاه OSA (Optical Spectrum Analyzer) برای اندازه‌گیری طیف لیزر خروجی استفاده شد. در طیف خروجی که در شکل (۲) نشان داده شده است، در فاصله  $0.06\text{nm}$  از قله اصلی که پهنای طیفی آن  $0.02\text{nm}$  است، قله دیگری مشاهده شد که با توجه به مقدار بهره بریلوین فیبر سیلیکایی و ابعاد فیبر، نشان دهنده SBS است. توان برگشتی لیزر در توان  $6\text{W}$ ، برابر  $2\text{mW}$  بود که طبیعتاً بخشی از این توان مربوط به SBS است.



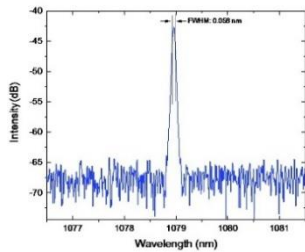
شکل (۲) مشاهده SBS در طیف خروجی لیزر  $6\text{W}$ .

برای رفع SBS، طول فیبر به  $3/5\text{m}$  تقلیل داده شد و آزمایش تکرار شد؛ اما این بار نیز نتیجه مشابه حالت قبل بود. برای رفع مشکل، طول فیبر فعال به  $5\text{m}$  قبلی برگردانده شد اما پهنای طیفی OC از  $0.05$  به  $0.2\text{nm}$  افزایش پیدا کرد و از لیزر دیودی  $25\text{W}$  شرکت nlight با فیبر خروجی  $100/125\mu\text{m}$  جهت پمپ استفاده شد. این بار در طیف خروجی لیزر که پهنای آن  $0.05\text{nm}$  و توان  $11\text{W}$  شده بود، SBS مشاهده نشد (افزایش پهنای طیفی لیزر با توجه به رابطه (۳) آستانه SBS را بالا می‌برد). توان نور برگشتی در این حالت  $3\text{mW}$  شد. توان خروجی نوسانگر باید به حد کافی بزرگ باشد تا بتواند وارونی جمعیت را در تقویت‌کننده به خوبی تخلیه کند. لذا از ۲ عدد دیود  $25\text{W}$  برای پمپ در نوسانگر استفاده شد که موجب شد توان خروجی نوسانگر به  $23\text{W}$  برسد. طیف خروجی در شکل (۳) نشان داده شده است. پهنای طیفی به  $0.058\text{nm}$  و توان نور برگشتی به  $6\text{mW}$  رسید.

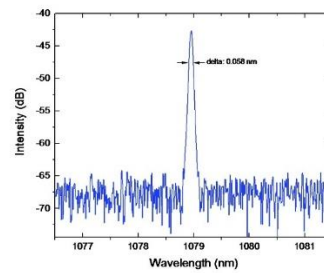
بازتاب بالا (HR) و بازتاب پایین (OC)، موجب پهن شدن طیف لیزر در توان‌های بالا می‌شود. چیدمان نوسانگر-تقویت‌کننده برای این منظور بسیار مناسب است؛ زیرا که اگر بتوان چشمه لیزری با توان کم و پهنای طیفی باریک ساخت و سپس آن را تقویت نمود، کنترل بسیار بیشتری بر روی طیف لیزر می‌توان داشت. انتخاب مناسب طول و قطر محیط فعال، درصد بازتاب و پهنای طیفی آینه‌های فیبری بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم افزار Liekki Application Designer v3.3 به دست آمده و سپس با قدری آزمون و خطا در عمل تصحیح شده است. در ابتدا دو عدد توری HR (۹۹ درصد) و OC (۱۰ درصد) با پهنای طیفی  $0.05\text{nm}$  و  $1/5\text{nm}$  بر روی فیبر حساس به نور  $8/130\mu\text{m}$  ساخته شد.  $5\text{m}$  فیبر  $10/125\mu\text{m}$  با ناخالصی ایتربیوم و با جذب  $6\text{dB/m}$  به عنوان محیط فعال در نظر گرفته شد. یک لیزر دیودی  $30\text{W}$  متعلق به شرکت Jenoptic در طول موج  $976\text{nm}$  برای پمپ انتخاب شد. از آنجاکه این دیود، فیبردار بود و فیبر متصل به آن  $220/230\mu\text{m}$  بود، لازم بود قطر  $220\mu\text{m}$  را با قرار دادن فیبر در اسید فلوریدریک  $40\%$  و بیرون کشیدن تدریجی آن از اسید به  $130\mu\text{m}$  (معادل قطر HR) رساند. این کار موجب اتلاف  $13$  وات در بیشینه جریان کاری لیزر دیودی شد و توان خروجی آن را به  $17\text{W}$  تقلیل داد. فیبر خروجی لیزر دیودی به آینه فیبری HR جوش داده شد. طرف دیگر HR به فیبر فعال و طرف دیگر فیبر فعال به OC جوش داده شد. بر روی فیبر خروجی OC یک خارج‌کننده نورهای غلافی ساخته شد و توان خروجی لیزر در بیشینه جریان لیزر دیودی (۴۷۸) اندازه‌گیری شد که  $6\text{W}$  بود. لیزر ساخته شده به طور شماتیکی در شکل (۱) نشان داده شده است.



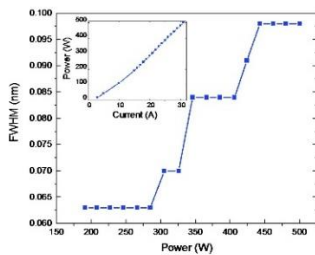
شکل (۱) چیدمان شماتیکی لیزر فیبری  $6\text{W}$ .



شکل (۵) طیف خروجی لیزر ۵۰۰W با پهنای طیفی ۰/۰۹۸nm

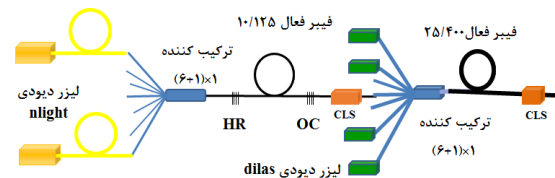


شکل (۳) طیف خروجی نوسانگر با توان ۲۳W و پهنای طیفی ۰/۰۵۸nm



شکل (۶) افزایش پهنای طیفی سیستم نوسانگر-تقویت کننده با افزایش توان لیزر- کادر کوچک: افزایش توان لیزر با افزایش جریان دیودها

حال می توان سیگنال مربوط به نوسانگر را تقویت نمود. در قسمت تقویت کننده از ۴ عدد دیود ۱۸۰ وات VBG دار متعلق به شرکت dilas، جهت پمپاژ استفاده شد. چیدمان شماتیکی سیستم نوسانگر-تقویت کننده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴) چیدمان شماتیکی سیستم نوسانگر- تقویت کننده

### جمع بندی

با انتخاب میزان بهینه پهنای طیفی آینه OC، طول و قطر مناسب فیبر فعال و چیدمان نوسانگر- تقویت کننده لیزر فیبری با توان ۵۰۰W و پهنای طیفی خروجی ۰/۰۹nm ساخته شد.

### مرجع ها

- [1] D. J. Richardson, J. Nilsson and W. A. Clarkson, "High power lasers: current status and future perspective", J. Opt. Soc. Am. B27. B63-B92 (2010)
- [2] Y. Qi, Y. Yang, H. Shen, B. He, and J. Zhou, "2.7 kW CW Narrow Linewidth Yb-doped all-fiber Amplifiers for Beam Combining Application", Laser Congress 2017(ASSL LAC)
- [3] C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin, T. Schreiber, T. Peschel, F. Brückner, T. Clausnitzer, J. Limpert, R. Eberhardt, A. Tünnermann, M. Gowin, E. ten Have, K. Ludewigt, and M. Jung, "2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers", Opt. Express 17, 1178-1183 (2009).
- [4] Y. Xu, Q. Fang, Y. Qin, X. Meng, and W. Shi, "2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser", Appl. Opt. 54, 9419-9421(2015).

در تقویت کننده از ۷/۳m فیبر ۲۵/۴۰۰μm متعلق به شرکت Nufern با جذب ۱/۸dB/m استفاده شد. برای ترکیب توان لیزرهای دیودی از ترکیب کننده ۱×(۱+۶) استفاده شد که شاخه های پمپ ورودی آن ۲۲۰/۲۳۰μm با NA=۰/۲۲ و شاخه سیگنال خروجی و سیگنال برگشتی آن ۲۰/۴۰۰μm با NA=۰/۴۶ برای غلاف و NA=۰/۰۶ برای مغزی می باشد. در انتهای لیزر یک عدد خارج کننده نورهای غلافی با فیبر ۲۵/۴۰۰μm به فیبر فعال تقویت کننده جوش داده شد. توان خروجی لیزر ۵۰۰W و پهنای طیفی ۰/۰۹nm به دست آمد. در شکل های (۵) و (۶) به ترتیب طیف خروجی تقویت کننده، تغییرات پهنای طیفی با افزایش توان لیزر و تغییرات توان لیزر با افزایش جریان دیودها نشان داده شده است. توان برگشتی در بیشینه توان تقویت کننده به ۱۲۰mW رسید.