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

بررسی اثرات مدولاسیون فاز بر افزایش آستانه SBS در تقویت‌کننده‌های فیبری تک فرکانس پرتوان

محمد کریمی، ابراهیم آقایاری، احمد کامکار، وحید وطنی و سید حسن نبوی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

kamkar@inlc.ir

چکیده – در این مقاله، به بررسی اثرات مدولاسیون فاز بر افزایش آستانه اثر غیرخطی پراکندگی بریلوئن در تقویت‌کننده‌های فیبری می‌پردازیم. به صورت تئوری و عملی نشان داده می شود که اعمال مدلاسیون متناوب بر فاز پرتو منجر به ایجاد مولفه‌های فرکانسی جانبی جدیدی در اطراف فرکانس مرکزی می‌گردد. این روش منجر به افزایش آستانه SBS می‌شود. همچنین اثر تغییرات فرکانس مدولاسیون و دامنه آن در آستانه SBS بررسی گردید. با انتخاب فرکانس بهینه ۶۰ مگاهرتز و دامنه ۳۰dBm، در یک ساختار تقویت‌کننده فیبری سه مرحله‌ای به توان خروجی ۲۸۰ وات با پهنای طیفی بسیار نازک رسیدیم.

کلید واژه-اثر غیرخطی پراکندگی بریلوئن القایی، تقویت‌کننده تک فرکانس، تقویت‌کننده فیبری، مدولاسیون فاز

Investigation of Phase Modulation for SBS Threshold Enhancement in Single Frequency High-Power Amplifiers

Mohammad Karimi, Ebrahim Aghayari, Ahmad Kamkar, Vahid Vatani and Seyed Hassan Nabavi

Iranian National Center for Laser Science and Technology
kamkar@inlc.ir

Abstract- In this paper we report the effect of phase modulation on increasing the threshold of non-linear Brillouin Scattering effect in fiber amplifiers. We theoretically and experimentally show that, applying phase modulation generates numerous new side-bands around the central frequency. This technique results in immense enhancement on SBS threshold. The effect of frequency and amplitude variation on SBS threshold is investigated. We obtain 280 W output power by optimizing the frequency to 60 MHz and the amplitude to 30 dBm, in a 3-stage fiber amplifier with narrow line-width.

Keywords: Fiber Amplifier, Phase Modulation, Single Frequency Amplifier, Stimulated Brillouin Scattering.

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

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

مقدمه

لیزرهای فیبری امروزه، در زمینه‌های مختلف از قبیل صنعت، پزشکی و سیستم‌های نظامی کاربردهای وسیعی پیدا کرده‌اند. کیفیت پرتوی لیزرهای فیبری بسیار عالی و نزدیک به حد پراش است. همچنین در سال‌های اخیر توان خروجی این لیزرها افزایش داشته و به سطوح چشم‌گیری رسیده است. با این وجود، تلاش برای دست‌یابی به توان‌های بالاتر همچنان از اهمیت بالایی برخوردار است و این موضوع از زمینه‌های جذاب تحقیقاتی می‌باشد.

به دلیل محدودیت قطعات و اجزای لیزرهای فیبر نوری، حداکثر توان قابل حصول با کیفیت پرتوی مناسب محدود است [۱]. به منظور رفع این مشکل و دست‌یابی به توان‌های بالاتر از حد یک تک لیزر، روش‌های ترکیب پرتوهای لیزری، بسیار متداول می‌باشد.

از میان روش‌های ترکیب پرتو، روش ترکیب همدوس پرتوهای لیزری به دلیل حفظ درخشندگی پرتو، کارآمدترین شیوه ترکیب، محسوب می‌شود. در این روش، پرتو یک لیزر به چند شاخه تقسیم می‌گردد و بعد از چند مرحله تقویت، به منظور ایجاد پرتویی پرتوان، با هم ترکیب می‌گردند. لازم به ذکر است برای ترکیب همدوس، فاز تمام پرتوها می‌بایست به صورت فعال، کنترل گردد تا کیفیت پرتو نهایی در بهینه حالت ممکن قرار گیرد.

در سیستم ترکیب همدوس، نیاز به پرتوی اولیه با همدوسی زمانی بسیار بالا یا به عبارتی، لیزر تک فرکانس می‌باشد.

عامل محدود کننده افزایش توان خروجی در تقویت‌کننده‌های تک فرکانس، اثر غیرخطی پراکندگی القایی بریلوئن[۱] (SBS) می‌باشد. در واقع می‌توان نشان داد که آستانه ظهور موج استوکس SBS که به سمت عقب منتشر می‌شود، با کاهش پهنای طیفی لیزر کاهش می‌یابد [۲]. بنابراین آستانه SBS در یک تقویت‌کننده تک فرکانس، بسیار پایین است. این امر سبب ایجاد مانع بزرگی در افزایش توان در تقویت‌کننده‌های تک فرکانس می‌شود.

برای ایجاد یک سیستم ترکیب همدوس پرتوان، می‌بایست از تقویت‌کنندهای تک فرکانس استفاده نمود، و این امر تنها با افزایش چشم‌گیر آستانه SBS میسر می‌گردد. در ادامه به بررسی اعمال مدولاسیون فاز و اثر آن بر افزایش آستانه SBS در تقویت‌کننده‌های تک فرکانس می‌پردازیم.

اصول تئوری

میدان الکتریکی یک لیزر تک فرکانس را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$E(t) = A\sin[\omega_L t + \varphi(t)] \qquad (۱)$$

که در آن A و ω_L به ترتیب، دامنه و فرکانس نور لیزر می‌باشند. با اعمال فاز سینوسی توسط مدلاتور فاز، میدان به صورت زیر نوشته می‌شود

$$E(t) = A\sin[\omega_L t + \beta\cos(\omega_m t) + \varphi_0] \qquad (۲)$$

که در آن β عمق و ω_m فرکانس مدولاسیون می‌باشند. در این رابطه، φ_0 فاز کندتغییر پرتو می‌باشد. رابطه (۲) را می‌توان بر حسب توابع بسل بسط داد

$$E(t) = A \times \mathrm{Re}\left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta)\exp(\mathrm{i}(\omega_L + n\omega_m)t + \varphi_0)\right] \qquad (۳)$$

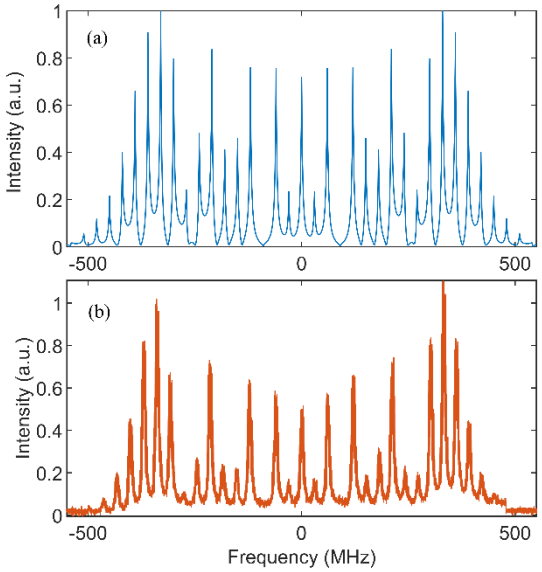
همانطور که در رابطه (۳) مشخص است، اعمال مدولاسیون متناوب به فاز یک پرتو، سبب تقسیم آن به مولفه‌های مختلف فرکانسی، با اختلاف فرکانس مضربی از فرکانس مدولاسیون می‌گردد. در شکل (۱)، طیف پرتو برای مدولاسیون سینوسی رسم شده است. در این اینجا فرکانس

[۱] Stimulated Brillouin Scattering

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

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

مدولاسیون ۳۰ MHz و عمق مدولاسیون برابر با ۱۰ ولت می‌باشد. بنابراین با کمک مدولاسیون فاز، می‌توان یک لیزر تک فرکانس را به تعداد زیادی خط با فاصله فرکانسی مساوی تقسیم نمود. از طرفی، بهره SBS به شکل طیفی لیزر وابسته است [۳] و با تقسیم انرژی یک پرتو تک فرکانس در چندین خط، آستانه SBS به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۱: طیف یک لیزر تک فرکانس با اعمال مدولاسیون فاز به صورت سینوسی. (a) شبیه‌سازی طیف و (b) طیف اندازه‌گیری شده.

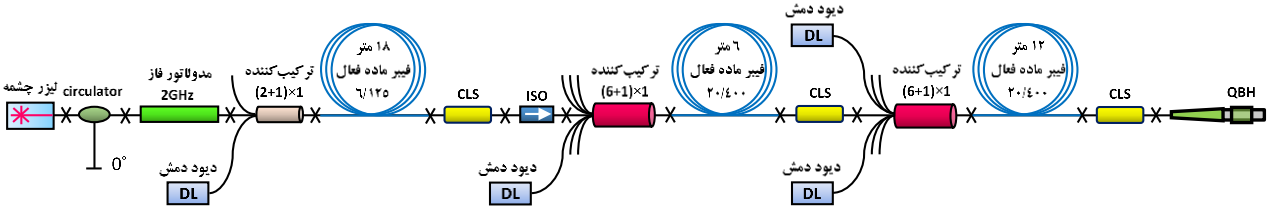
چیدمان آزمایشگاهی

در شکل ۲، طرحواره چیدمان مورد استفاده، ترسیم شده است. در این چیدمان، از یک لیزر تک فرکانس با پهنای خط کمتر از ۵ کیلوهرتز در طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر، استفاده شده است. پرتو لیزر، بعد از عبور از مدولاتور فاز الکترواپتیکی با فرکانس کاری ۲ گیگاهرتز، وارد سه مرحله تقویت‌کننده می‌شود. تقویت‌کننده اول، سیگنال ۷۰ میلی‌واتی را تقویت و به ۱٫۵ وات می‌رساند. این مرحله، از فیبر فعال آلاییده به ایتربیوم با قطر مغزی به غلاف ۶/۱۲۵ میکرومتر به طول ۱۸ متر تشکیل شده است. مرحله دوم تقویت‌کننده، از ۶ متر فیبر فعال ۲۰/۴۰۰ استفاده می‌کند. این تقویت‌کننده، توسط یک دیود با طول‌موج ۹۷۶ نانومتر پمپ می‌شود و می‌تواند توان سیگنال ۱٫۵ واتی را تا ۵۰ وات افزایش دهد.

توان سیگنال در آخرین مرحله تقویت، از ۵۰ وات به حدود ۲۸۰ وات می‌رسد. در این مرحله، از ۱۲ متر فیبر فعال ۲۰/۴۰۰ و دو دیود با توان ۱۸۰ وات و طول‌موج ۹۷۶ نانومتر برای پمپ استفاده شده است. در انتهای هر مرحله تقویت، المان خارج کننده نور غلافی تعبیه شده است، تا از آسیب ناشی از پمپ جذب نشده در ماده فعال، جلوگیری شود.

بحث و نتایج

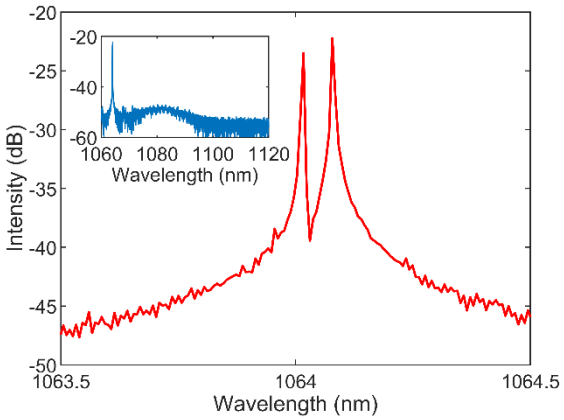
اندازه‌گیری توان و طیف نور برگشتی، از طریق شاخه برگشتی چرخاننده، در ابتدای چیدمان شکل ۲ صورت می‌پذیرد. به دلیل طیف بسیار تیز لیزر، آستانه اثر SBS بسیار پایین است. در واقع بدون اعمال مدولاسیون، تنها می‌توان سیگنال لیزر را تا ۱٫۵ وات تقویت کرد. طیف نور برگشتی در این توان در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این شکل ارتفاع قله‌ی SBS، از قله‌ی لیزر اصلی بیشتر شده است. همان‌طور که در شکل الحاقی شکل (۳) مشخص است، نسبت سیگنال به نویز در این تقویت‌کننده نزدیک به ۳۰ dB می‌باشد که نشان دهنده عدم تولید گسیل خودبه‌خودی تقویت‌شده (ASE)، در تقویت‌کننده است.



شکل ۲: طرحواره چیدمان آزمایشگاهی افزایش آستانه اثر غیرخطی SBS. اندازه‌گیری طیف و توان نور برگشتی از شاخه برگشتی چرخاننده صورت می‌گیرد.

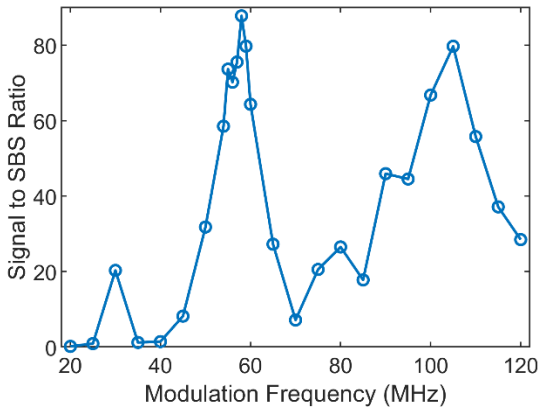
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

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



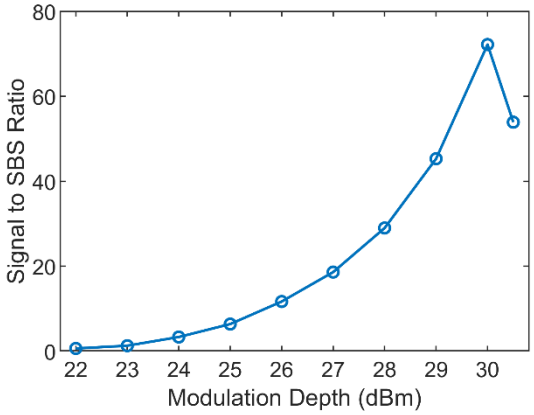
شکل ۳: طیف لیزر نور برگشتی تقویت‌کننده در ۱٫۵ وات. در شکل الحاقی، طیف لیزر در محدوده طیفی وسیع‌تری نمایش داده شده است.

برای کاهش SBS و دست‌یابی به توان‌های بالاتر، از مدولاسیون فاز استفاده می‌گردد. این امر با اعمال یک سیگنال RF به مدولاتور الکترواپتیکی موجود در چیدمان شکل (۲) صورت می‌گیرد. در شکل (۴)، نسبت سیگنال به SBS برحسب فرکانس مدولاسیون فاز در توان ۴۰ وات برای خروجی لیزر، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در فرکانس ۶۰ MHz، بهترین نسبت برای سیگنال به SBS، به دست آمده است.



شکل ۴: نسبت سیگنال به SBS برحسب فرکانس مدولاسیون.

طبق رابطه (۳)، علاوه بر فرکانس، عمق مدولاسیون نیز در شکل طیف لیزر و درنتیجه، بهره SBS مؤثر است. نسبت سیگنال به SBS به ازای عمق مدولاسیون مختلف در توان ۴۰ وات اندازه‌گیری و در شکل (۵) ترسیم شده است.



شکل ۵: نسبت سیگنال به SBS برحسب عمق مدولاسیون فاز.

نتیجه‌گیری

با انتخاب مناسب دامنه و فرکانس مدولاسیون، می‌توان آستانه SBS را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. با چیدمان ارائه شده در شکل (۲) و استفاده از تکنیک مدولاسیون فاز، یک تقویت‌کننده تک فرکانس با توان خروجی ۲۸۰ وات، با کارآیی تبدیل نوری نزدیک به ۸۰٪ در طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر، با پهنای خط ۵ کیلوهرتز به دست آمد، که برای ترکیب همدوس پرتوها، بسیار ایده‌آل است.

مرجع‌ها

[1] C. Jauregui1, J. Limpert, A. Tünnermann, “High-power fire lasers”, Nat. Photon., https://doi.org 10.1038/NPHOTON.2013.273, 2013

[2] R. Boyd, *Nonlinear Optics (3rd ed.)*, p. 436, Academic Press, 2008.

[3] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics (5th ed.)*, p. 354, Academic Press, 2013.

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

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