بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

رفتار طیفی متفاوت باریکه لیزری در بازتاب از آینه مزدوج فاز نسبت به آینه معمولی

محمد جابری[۱،۲]، امیر حسین فرهبد[۱] و حمید رحیم پور سلیمانی[۲]

[۱] تهران انتهای کارگر شمالی پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، ساختمان باهنر

[۲] رشت خیابان نامجو دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده- در این مقاله رفتار مزدوج فازی به کمک دو سلول SBS در یک تقویت کننده دو عبوری مورد بررسی تجربی و تحلیل نظری قرار گرفته و با نتایج حاصل از باتاب موج از یک آینه معمولی مقایسه شده است. بدین منظور شدت میدان اپتیکی به ازای چند حالت مد طولی نوسانگر لیزر، مورد توجه و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج رفتار طیفی کاملاً متفاوتی را از آینه مزدوج فازی در مقایسه با آینه ساده تمام بازتابان، نشان می‌دهد در حالی که میدان تقویت شده تا حد زیادی عاری از زنش های مدی میگردد این رفتار برای اولین بار مورد توجه قرار گرفته و خاصیت جدیدی از آینه های SBS را نشان می دهد

کلمات کلیدی: آینه مزدوج فازی، پراکندگی القایی بریلوئن، رفتار طیفی، ساختار مد طولی.

Different Spectral Behavior of Phase Conjugate beam in contrast to the reflected beam

Jaberi, Mohammad[۱،۲]; Farahbod, Amir Hossein[۱]; Rahimpur Soleimani, Hamid[۲]

[۱] Plasma Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran
Rasht. University, [۲] Department of Physics, Guilan

In this paper, the spectral behavior of a two-cell phase conjugated mirror (PCM) with a two-pass Nd:YAG amplifier has been analyzed experimentally and theoretically and compared to the conventional mirror. For this purpose, amplifier input intensity for the two different states of laser oscillator with two and more longitudinal modes have been investigated. Results of the Fourier analysis of the amplified intensity show considerable differences between Fourier amplitudes of the amplifier equipped with PCM and a two-pass amplifier with a conventional turning mirror under the same output energy. The amplifier with PCM has a completely filtered and different spectral behavior with clearly reduction of the beating between Fourier components of the input optical field.

Keywords: Phase Conjugation mirror, Stimulated Brillouin Scattering, Optical Spectral behavior.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

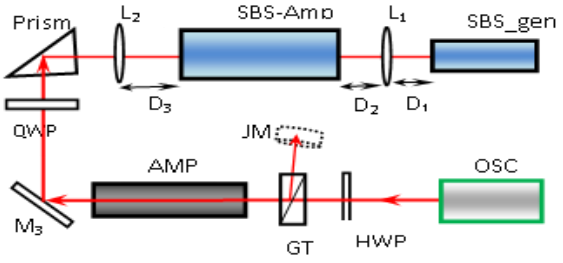
۱- مقدمه

استفاده از آینه مزدوج فازی از طریق پراکندگی القایی بریلوئن (SBS) به منظور تولید میدان مزدوج بازتابی برای جبران اثرات غیر خطی و اصلاح ابیراهی‌های نوری و همچنین فشردن و کوتاه نمودن زمانی تپ بسیار مورد توجه است. لذا هنگام استفاده از تقویت کننده‌های دو عبوری بهتر است از یک یا دو سلول بریلوئن بهره برد[۱و۲]. کیفیت فضایی باریکه بازتابی و تکرارپذیری نتایج در آرایش دو سلولی نسبت به آرایش تک سلولی به مراتب بهتر می‌باشد[۳و۴]. از سوی دیگر وجود آستانه پراکندگی سبب می‌شود تا شدت میدان پراکنده شده ساختار طیفی متفاوتی در مقایسه با شدت میدان دمش از خود نشان دهد. ویژگی اخیر برای دمش با باریکه حاوی چند مد طولی نوسانی حائز اهمیت است

در پژوهش حاضر رفتار زمانی پالس استوکس برگشتی از آینه مزدوج فاز با دو سلول SBS در ساختار دوعبوری از یک تقویت کننده حالت جامد مورد مطالعه قرار گرفته. بدین منظور از یک نوسانگر با قابلیت تنظیم تعداد مدهای طولی[۵] مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تغییر تعداد مدهای طولی در پالس دمش به مقایسه پالس بازتابی از آینه مزدوج فاز (PCM) و آینه معمولی (CM) پرداخته می‌شود

۲- آرایش تجربی

از یک نوسانگر حلقوی ناهم سطح همراه با یک تقویت کننده با محیط فعال Nd:YAG و استفاده از آینه در انتهای چیدمان برای ایجاد ساختار دو عبوری بهره برده شد. (شکل ۱). کنترل تعداد مدهای طولی نوسانگر به کمک دو سنجه فابری-پرو صورت می‌گیرد. شکل نوسانگر و روش ایجاد مدهای طولی در مرجع [۵] شرح داده شده است. این نوسانگر از پایداری بسیار بالا و حساسیت کم نسبت به نامیزانی آینه‌ها برخوردار است. در تمام اندازه‌گیری‌ها انرژی دمش نوسانگر ثابت و برابر با ۲۸ ژول، نیم پهنای زمانی بیشینه پالس دمش ۳۰ ns و پهنای پالس از ابتدا تا انتهای آن حدود ۹۰ ns می‌باشد [۵]. یک تیغه نیم موج (HWP) برای همسو کردن صفحه قطبش میدان خروجی با محور قطبی کننده گلن-تامسون (GT) به کار گرفته شده و انرژی ورودی به تقویت کننده (AMP)، ۱۱±۰/۵ میلی ژول است.



شکل ۱: آرایش تجربی مورد مطالعه رفتار طیفی با آینه مزدوج فازی با ۲ سلول SBS در آرایش دو عبوری، OSC: نوسانگر، HWP: تیغه ربع موج، GT: قطبی کننده گلن تامسون، AMP: محیط فعال تقویت کننده، QWP: تیغه ربع موج، L_2 عدسی با فاصله کانونی ۱۰۰ cm، SBS-AMP: سلول تقویت کننده، SBS-gen: سلول مولد و L1 عدسی با فاصله کانونی ۴۰۰ mm.

باریکه تقویت شده پس از بازتابش از آینه (معمولی یا مزدوج فاز) با عبور مجدد از تقویت کننده به کمک قطبی کننده GT به بیرون هدایت می‌شود. به وسیله تیغه‌های شیشه‌ای از باریکه‌های لیزری نمونه برداری و رفتار زمانی و تبدیل فوریه شدت میدان خروجی به کمک فوتودایود سریع PD، و یک اسیلوسکوپ با پهنای باند ۵۰۰ مگاهرتز ثبت و مشاهده شده است. آینه مزدوج فاز متشکل از عدسی $L_2 = 100\,cm$، سلول تقویت کننده به طول $L_a = 43\,cm$، عدسی $L_1 = 40\,cm$ و سلول مولد $L_g = 315\,mm$ می‌باشد. در این آرایش طول همدوسی حدود ۶۰ cm و طول برهمکنش ۴۰cm که هر دو کوچکتر از طول آینه مورد آزمایش هستند.

۳-روش محاسبه

تحلیل ریاضی رفتار شدت میدان پراکنده شده القایی استوکس از آینه دو سلولی و چگونگی تاثیر محیط تقویت کننده لیزر بر آن می‌تواند به صورت ذیل همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱- حل عددی معادلات (۱) برای تقویت کننده لیزر در اولین و دومین عبور باریکه لیزری با شدت I_i (متناظر با علامت + و −) و تفاوت انبوهی N [۹].

۲- حل معادلات مربوط به SBS که معادلات نرخ مربوط به شدت میدان دمش (I_{Pj})، شدت میدان استوکس پراکنده شده (I_{Sj}) و دامنه امواج صوتی در سلول‌ها (S_j)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

می‌باشد(معادلات ۲) که برای سلول مولد و تقویت کننده با نشانه $j=a,g$ نشان داده شده است. به همراه شرایط مرزی مناسب که در معادلات (۳) آورده شده است، [۶].

$$\frac{\partial I_i}{\partial t}\pm\left(\frac{c}{n}\right)\frac{\partial I_i}{\partial z}=N\left(\frac{c}{n_r}\right)\sigma_e I_i-\beta\left(\frac{c}{n_r}\right)I_i \qquad (a-۱)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}=-N\sigma_e\frac{I_i}{h\upsilon_\circ}-\frac{\Omega}{4\pi}\frac{N}{\tau_f};\qquad i=1,2 \qquad (b-۱)$$

$$\frac{\partial I_{pj}(z,t)}{\partial z}+\left(\frac{n}{c}\right)\frac{\partial I_{pj}(z,t)}{\partial t}=-S_j\sqrt{I_{Sj}I_{pj}}-\frac{I_{pj}}{A_{pj}(z)}\frac{\partial A_{pj}(z)}{\partial z} \qquad (a-۲)$$

$$\frac{\partial I_{Sj}(z,t)}{\partial z}-\left(\frac{n}{c}\right)\frac{\partial I_{Sj}(z,t)}{\partial t}=-S_j\sqrt{I_{Sj}I_{pj}}-\frac{I_{Sj}}{A_{Sj}(z)}\frac{\partial A_{Sj}(z)}{\partial z}; \qquad (b-۲)$$

$$\frac{\partial S_j(z,t)}{\partial t}=\frac{1}{2\tau_B}\left[g_B\sqrt{I_{Sj}I_{pj}}-\left(S_j(z,t)-S_o\right)\right] \qquad (c-۲)$$

$$I_{Pg}(\cdot,t)=T\left(\frac{w_{Pa}(L_a)}{w_{Pg}(\cdot)}\right)^2 I_{Pa}(L_a,\,t-\tau) \qquad (a-۳)$$

$$I_{Sa}(L_a,t)=T\left(\frac{w_{Pg}(\cdot)}{w_{Pa}(L_a)}\right)^2 I_{Sg}(\cdot,\,t-\tau) \qquad (b-۳)$$

در معادله (۱)، c سرعت نور، $\sigma_e=2.8\times10^{-19}\,cm^2$ سطح مقطع گسیل القایی، $\tau_f=240\,\mu s$ طول عمر گسیل خودبخود تراز بالای Nd:YAG در $1064\,nm$، $\beta=0.01\,cm^{-1}$ ضریب جذب میله لیزر مطابق با اندازه‌گیری‌های تجربی است. شاخص i به اولین و دومین عبور از تقویت کننده اشاره دارد. در روابط (۲) مقادیر $g_B=20\,cm/GW$ و $\tau_B=2\,ns$ نیز به ترتیب بهره بریلوئن و طول عمر موج اکوستیکی برای محیط استن است. در رابطه (۳) مقدار τ زمان لازم برای طی فاصله D_1+D_2 توسط باریکه است. $w_{Pj}(z)$ اندازه لکه باریکه دمش در مکان z از سلول SBS است. مقدار عبور دهی از سلول تقویت کننده به سلول مولد برابر با $T=0.87$ می‌باشد.

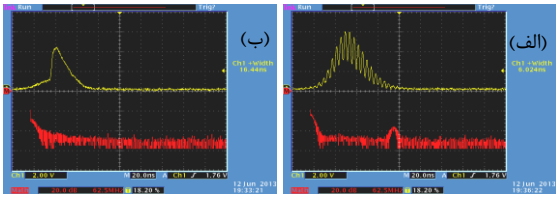
با استفاده از روابط حاکم بر اندازه لکه یک باریکه گاوسی $\omega(z)$ سطح مقطع پرتو و چگونگی تغییرات آن حین انتشار در محیط غیر خطی، را در حل معادلات (۲) مد نظر قرار می‌دهیم[۶]. پالس تک مد مشاهده شده برای نوسانگر سوئیچ Q را به کمک برازش ترکیبی از دو تابع گاوسی و بقیه حالات مدی را با استفاده از ترکیب خطی مدهای طولی با اختلاف فرکانس $\Delta\upsilon_{ring}=240\,MHz$ بدست آمد[۷]. در محاسبات انجام شده پالس‌هایی شبیه پالس‌های تجربی با اختلافی کمتر از یک در صد تولید گردید. ضریب بهره محاسبه شده برای تقویت کننده با توجه به مقادیر تجربی $0.125\,cm^{-1}$ بدست آمده است.

۴-نتایج و بحث

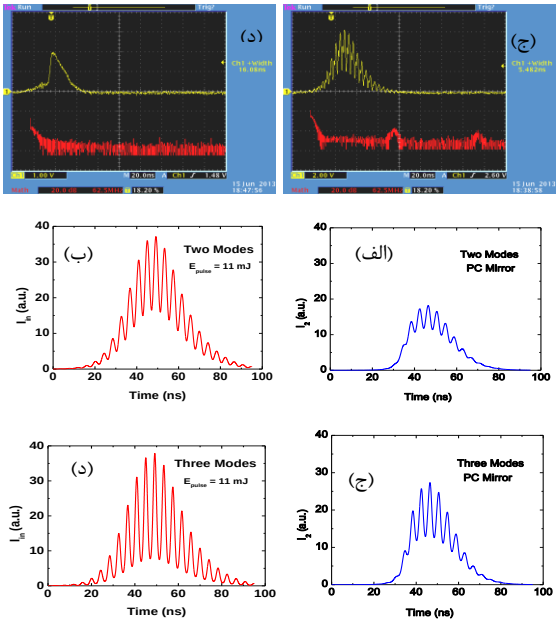
نمونه تجربی و محاسباتی از رفتار زمانی پالس نوسانگر و پالس استوکس ناشی از آینه مزدوج فازی پس از دومین عبور از تقویت کننده ، برای دو و چند فرکانس طولی در شکل ۲ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. رفتار طیفی و دامنه مولفه‌های فوریه در زیر نمودار زمانی به رنگ قرمز قابل مشاهده است. در نتایج تجربی مولفه استوکس پراکنده شده، رفتار زمانی و طیفی کاملاً متفاوتی با میدان دمش دارد و عملاً زنش مدی بر روی نیمرخ پالس استوکس مشاهده نمی‌شود. این رفتار در نتایج محاسباتی نیز خود را نمایان کرده و زنش مدی در شکل زمانی پالس بسیار کاهش یافته است.

رفتار مولفه های فوریه میدان استوکس تقویت شده برحسب مقادیر گوناگون دامنه مد طولی در باریکه دمش برای تقویت کننده دو عبوری با استفاده از آینه معمولی و آینه SBS دو سلولی در شکل‌های ۳و۴ از حل سیستم معادلات (۱) و (۲) به همراه شرایط مرزی (۳) برای شدت میدان ورودی به روش تفاوت محدود مرکزی بدست آمده و مورد مقایسه قرار گرفته است. در این نمودارها دامنه مد اصلی ($a_\circ$) برابر با ۱ فرض شده و دامنه بقیه مدها نسبت به مد اصلی نرمال شده‌اند.

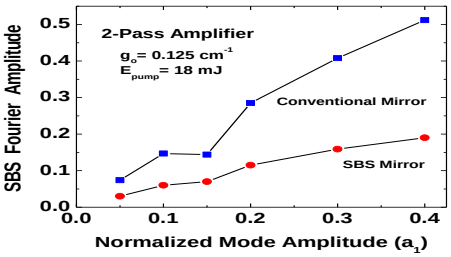
در شکل ۳ دامنه فوریه موج استوکس (دایره) و موج بازتابی از آینه معمولی (مربع) به ازای دو فرکانس طولی بر حسب مقادیر گوناگون مد دوم (a_1)ترسیم شده است و نشان از کاهش دامنه مد دوم پالس استوکس نسبت به باریکه بازتابی از آینه دارد. همچنین شکل ۴ نتایج بدست آمده را برای ۵ فرکانس طولی نشان داده شده است. در تمامی محاسبات انرژی خروجی از تقویت کننده $E_{out}=6.8\,mJ$ ثابت بوده است.



[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

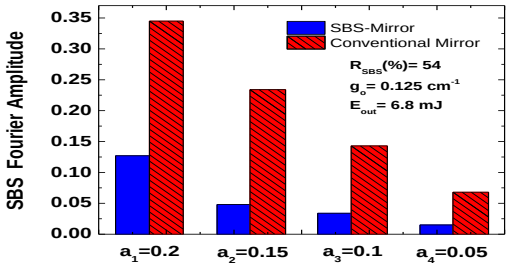


شکل۲ : رفتار زمانی پالس نوسانگر دو عبوری توسط اسیلوسکوپ و به صورت عددی در حالت دو مدی (الف) و چند مدی (ج) با انرژی دمش ۲۹ ژول . پالس زمانی استوکس در حالت دو مدی (ب) و چند مدی (د) می‌باشند.



شکل۳ : مقایسه رفتار محاسبه شده برای دامنه فوریه موج استوکس پراکنده از آینه ۲ سلولی مزدوج فازی(دایره‌های تو پر) و آینه معمولی (مربع‌های تو پر) پس از ۲ بار عبور از تقویت کننده به ازای ۲ فرکانس طولی در نوسانگر لیزر بر حسب مقادیر گوناگون دامنه بهنجار شده برای مد دوم .

تمامی محاسبات و نتایج بدست آمده در شکل‌های ۳-۴ نمایانگر کاهش قابل ملاحظه دامنه مولفه‌های فوریه پراکنده شده از بازتابنده مزدوج فازی نسبت به باریکه بازتابی از آینه معمولی در حد ضریب ۲ تا بیش از ۳ است که تاثیر چشمگیری در پالایش طیفی میدان تقویت شده خروجی از تقویت کننده از خود نشان می دهد. بهره اولیه تقویت کننده اپتیکی $g_o = ۰/۱۲۵\ cm^{-۱}$ است.



شکل۴ : رفتار محاسبه شده برای دامنه فوریه موج استوکس پراکنده از آینه ۲ سلولی مزدوج فازی و آینه معمولی برحسب دامنه اولیه حاوی۵ فرکانس طولی

۱- نتیجه گیری

نتایج محاسبات عددی ارائه شده برای رفتار طیفی میدان پراکنده شده استوکس از بازتابنده بریلوئن، نشان از تاثیرات چشمگیر آینه مزدوج فازی در کاهش قابل ملاحظه افت و خیزهای شدت میدان شود و میدان خروجی‌ای، پرتوان و نسبتاً عاری از زنش‌های فرکانسی را بدست دهد که برای اولین بار در پژوهش حاضر مورد تحلیل قرار گرفت که با نتایج تجربی تطابق خوبی از خود نشان داده است. هموار شدن نیمرخ زمانی تپ و پالایش طیفی پالس استوکس بازگشتی می‌تواند منجر به افزایش همزمانی پالس‌ها و حذف فرکانس‌های غیر ضرور و افزایش بازدهی در مجموعه‌های لیزری پر توان گردد.

مراجع

۱.Kong, H.J., et al., Current trends in laser fusion driver and beam combination laser systems using stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors for a fusion driver. J. Korean Phys. Soc, ۲۰۱۰. ۵۶: p. ۱۷۷-۱۸۳.

۲.Omatsu, T., et al., The Current Trends in SBS and phase conjugation. Laser and Particle Beams, ۲۰۱۲. ۳۰(۰۱): p. ۱۱۷-۱۷۴.

۳.Crofts, G. and M. Damzen, Steady-state analysis and design criteria of two-cell stimulated Brillouin scattering systems. Optics communications, ۱۹۹۱. ۸۱(۳): p. ۲۳۷-۲۴۱.

۴.Crofts, G., M. Damzen, and R. Lamb, Experimental and theoretical investigation of two-cell stimulated-Brillouin-scattering systems. JOSA B, ۱۹۹۱. ۸(۱۱): p. ۲۲۸۲-۲۲۸۸.

۵.Jaberi, M., A. Farahbod, and H. Rahimpur Soleimani, Longitudinal mode structure in a non-planar ring resonator. Iranian Journal of Physics Research, ۲۰۱۳. ۱۳(۱): p. ۳۵-۴۴.

۶.Menzel, R. and H.J. Eichler, Temporal and spatial reflectivity of focused beams in stimulated Brillouin scattering for phase conjugation. Physical Review A, ۱۹۹۲. ۴۶: p. ۷۱۳۹-۷۱۴۹.

۷.Brignon, A. and J.-P. Huignard, Phase conjugate laser optics. Vol. ۹. ۲۰۰۴: Wiley. com.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]