



اثر تغییر طول سلول و شدت انرژی ورودی بر پراکندگی القایی بریلوئن در ساختار تک سلولی

محمد جابری^{۱*}، سمیه پناهی بخش^۲، پگاه جمشیدی^۲، اکبر نظری گلشن^۳

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران- ایران

۲. پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران- ایران

۳. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهد، صندوق پستی، ۱۵۹-۱۸۱۵۵، تهران- ایران

*Email: mohammad.jaberi@gmail.com

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۴/۵

چکیده

در این پژوهش رفتار باریکه استوکس بازگشتی از آینه مزدوج فازی ناشی از پراکندگی القایی بریلوئن (SBS-PCM) در استون خالص، به‌طور تجربی بررسی شده است. میزان تغییرات انرژی بازتابی از آینه مزدوج فاز و پهنای زمانی تپ استوکس در اثر ایجاد تغییرات در شار انرژی ورودی به سلول و تغییر طول برهم‌کنش برای ساختار تک سلولی، مورد مطالعه قرار گرفت. بدین جهت با تغییر طول سلول و تغییر ساختار هندسی آینه مزدوج فاز جهت رسیدن به بهینه چیدمان اپتیکی برای بیشینه بازدهی و کمینه پهنای زمانی پرداخته شده است. تغییرات انرژی و پهنای زمانی بازتابی از آینه مزدوج فاز برای حالت‌های در نظر گرفته شده با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد با تغییر در هندسه برهم‌کنش انرژی بازتابی از آینه مزدوج فاز قابل بهینه‌سازی است. با افزایش شدت باریکه ورودی در انرژی ثابت، و تغییر در طول اندرکنش، می‌توان به کمینه پهنای تپ بازتابی برحسب انرژی ورودی دست یافت.

کلیدواژه‌ها: پراکندگی القایی بریلوئن، نیروی باریکه استوکس، آینه مزدوج فاز

Influence of cell length and input intensity changes on the Stimulated Brillouin Scattering in the single-cell setup

M. Jaberi^{1*}, S. Panahi bakhsh², P. Jamshidi³, A. Nazari Golshan³

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran
2. Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran
3. Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Shahed University, P.O.Box:18155-159, Tehran-Iran

Technical Paper

Received 3.4.2021, Accepted 26.6.2021

Abstract

This paper investigated the temporal behavior of the backward Stokes pulse from a stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror (SBS_PCM) in a pure acetone medium. Changes in the reflected energy of the phase-conjugate mirror and the temporal width of the Stokes pulse due to changes in the input energy flux to the cell and changes in the interaction length were studied for the single-cell structure. For this purpose, to achieve the optimal optical arrangement for maximum efficiency and minimum pulse width in full width half maximum, the cell length and the geometric structure of the phase conjugate mirror have been changed. Variations of the energy and the reflected Stokes pulse width of the phase conjugate mirror were compared for the considered cases. The results show that the reflected energy of the phase conjugate mirror can be optimized by changing the interaction geometry. By increasing the intensity of the input beam at constant energy and changing the interaction length, the minimum reflected pulse width was achieved in terms of input energy.

Keywords: Stimulated brillouin scattering, Stokes pulse, Phase-conjugate mirror



۱. مقدمه

در سال‌های اخیر تولید و توسعه تپ‌های کوتاه و افزایش انرژی لیزر و ایجاد لیزرهای پرتوان به واسطه کاربردهای گسترده آن بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به تولید هماهنگ‌های مرتبه بالاتر با دقت طیفی زیاد در طیف‌سنجی مولکول‌ها و اتم‌ها [۱] منابع مؤثر دمش برای تقویت پارامتری [۲] محصورسازی اینرسی (ICF)، شتاب‌دهی ذرات [۳] اشاره نمود.

پراکندگی القایی بریلوئن^۱ (SBS) به واسطه کاربردهای آن و قابلیت استفاده در تمامی حالات ماده (مایعات، گازها و جامدات و پلاسما) به عنوان روشی پایدار، ارزان، با ساختاری ساده و قابلیت به‌کارگیری در انرژی‌های بالا، یکی از روش‌های مناسب برای فشرده‌سازی تپ‌های لیزری و تولید تپ‌های کوتاه (از مرتبه پیکو ثانیه) همگام با افزایش توان قله می‌باشد. تولید آینه‌های مزدوج فاز اپتیکی براساس پراکندگی القایی بریلوئن^۲ (SBS_PCM) به جهت بهبود کیفیت فضایی باریکه، جبران اثرات غیرخطی و ابیراهی‌های نوری ناشی از عبور نور از قطعات نوری نیز از مزایای مورد توجه می‌باشد [۴-۷]. به عنوان مثال از آینه‌های (SBS-PCM) با ضریب بازتاب ۹۵٪ در سیستم پراکندگی تامسون توکامک JT-۶۰U با توان ورودی ۱۴۵ وات و انرژی ۲/۹ ژول استفاده شده تا شدت نور پراکنده شده در یک ساختار چند عبوری از درون توکامک افزایش یابد [۸]. هم‌چنین یکی از بهترین روش‌های ترکیب باریکه‌های لیزری، استفاده از آینه‌های مزدوج فاز (SBS-PCM) می‌باشد. برای نمونه می‌توان در ساخت محرک‌های لیزری پر شدت با نرخ تکرار بالا در محصورسازی اینرسی، از این روش بهره برد [۹-۱۲].

تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در جهت بررسی عوامل مؤثر در فشرده‌سازی تپ به روش SBS انجام گرفته است. استفاده از آرایش‌های مختلف تک و دو سلولی [۱۳]، اثر نوع و خلوص ماده پراکننده [۶] و کاهش شدت آستانه [۱۴، ۱۵] برخی از این موارد می‌باشد. نتایج به‌دست آمده میزان فشرده‌گی را تا مرتبه طول عمر فونون صوتی در مدت زمان برهم‌کنش ماده نشان می‌دهد [۷، ۱۶] در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در جهت بهینه‌سازی چیدمان اپتیکی و سازوکارهای تولید تپ‌های کوتاه و پایدار به روش SBS انجام گرفته و تپ‌هایی کوتاه‌تر از طول عمر فونون صوتی به‌دست آمده است [۳]، در مرجع [۳] زو و همکارانش برخی از پارامترهای مهم مانند اثر بهره محیط

پراکننده، پایداری دمایی، را با همگام‌سازی شدت باریکه لیزر و استوکس در یک ساختار دو سلولی موازی، مورد بررسی قرار داده و نشان دادند برای داشتن ایجاد تپ استوکس با پهنای زمانی از مرتبه یک دهم طول عمر فونون (τ_B) با تنظیم راه نوری بین سلول مولد و تقویت‌کننده (به ایجاد تأخیر زمانی بین سیگنال استوکس سلول مولد و پمپ استوکس ورودی به سلول تقویت‌کننده) در حالی که شدت انرژی ورودی به سلول مولد از مرتبه شدت آستانه بریلوئن باشد، می‌توان به کمینه پهنای زمانی دست یافت [۳، ۱۷].

نکته دومی که می‌بایست به آن اشاره داشت این است که در اکثر مقالات منتشر شده با توجه به معادلات حاکم بر فرایند پراکندگی بریلوئن برای تولید تپ‌های کوتاه به روش SBS با بازدهی بیش‌تر انرژی از سلول‌هایی با طول نسبتاً زیاد (از مرتبه طول تپ لیزری در حدود ۱ الی ۱/۵ متر) بهره گرفته شده است [۱۷-۲۱]، لذا دست‌یابی به تپ‌های کوتاه با بازدهی بالا در سلول‌هایی با طول کوچک بسیار مورد توجه می‌باشد. بدین جهت، در پژوهش حاضر بهینه‌سازی انرژی ورودی به سلول با طول دلخواه و تأثیر هندسه برهم‌کنش در ایجاد کمینه پهنای زمانی بازتابی مد نظر می‌باشد با توجه به دانشی که نویسندگان این مقاله دارند [۲۲، ۲۳] تاکنون تحقیقات بین‌المللی در این زمینه انجام نشده است و گزارشی ارائه نشده است و پژوهش حاضر تحقیقات نوینی در این زمینه می‌باشد که به بخش بسیار مختصری از آن در مقاله کنفرانسی [۲۴] اشاره شده است.

نتایج حاصل شده نشان می‌دهد برخلاف نظراتی که تاکنون ارائه شده کمینه پهنای زمانی، در شدت‌های بیش‌تر از شدت آستانه رخ می‌دهد و برای سلول مولد با هر طول دلخواه یک کمینه در پهنای تپ بازگشتی وجود خواهد داشت. هم‌چنین، مکان تولید تپ استوکس درون سلول در میزان پهنای تپ خروجی و انرژی بازتابی نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. لذا با تغییر شدت باریکه ورودی و مشخصات هندسی آینه مزدوج فاز، علاوه بر کنترل میزان انرژی بازتابی، می‌توان به کمینه پهنای زمانی در سلول مولد دست یافت. بدین ترتیب با ایجاد تأخیر زمانی بین سلول مولد و تقویت‌کننده، پهنای زمانی کوتاه‌تر از مقادیر ارائه شده (یک دهم طول عمر فونون (τ_B))، دور از دسترس نخواهد بود.

در این پژوهش با استفاده از آرایش تک سلولی تغییرات شدت باریکه ورودی به سلول و طول برهم‌کنش در پاسخ‌دهی آینه مزدوج فاز به صورت تجربی مورد مطالعه، آزمون و مقایسه قرار گرفته است.

1. Stimulated Brillouin Scattering
2. Stimulated Brillouin Scattering Phase Conjugate Mirror



که در آن r_1 و r_2 به ترتیب شعاع انحنای میدان در نقطه انتهایی سلول و ابتدای سلول می‌باشد [۷]. با توجه به معادله (۵) امکان کوتاه‌تر کردن لبه صعودی تپ پراکنده به $t_{sle} \ll \tau$ وجود دارد و شرط تولید تپ کوتاه‌تر از زمان واهلش محیط $1 \gg (r_1 r_2) / (r_p r_p) (C/n) \tau / (g_B |A_p|^2)$ می‌باشد.

معادله (۵) نشان می‌دهد کاهش لبه صعودی تپ به حاصل ضرب سطح مقطع باریکه ورودی $(|A_p|^2)$ و طول برهم‌کنش $(C/n) \tau$ وابسته می‌باشد. به لحاظ فیزیکی مقدار بهینه‌ای برای پهنای زمانی به ازای حاصل ضرب $(C/n) \tau |A_p|^2$ با توجه به شعاع میدان ورودی وجود خواهد داشت. با توجه به مباحث ارائه شده، در مقاله حاضر به بررسی تأثیر هم‌زمان تغییرات سطح مقطع و طول برهم‌کنش در کوتاه‌سازی تپ پرداخته شده است و نتایج حاصله وجود نقطه بهینه در پهنای زمانی تپ را به صورت تجربی اثبات می‌نماید.

۳. چیدمان تجربی آزمایش

چیدمان تجربی آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. آرایش تجربی، متشکل از یک نوسانگر حلقوی تک جهتی با محیط فعال Nd:YAG سویچ Q غیرفعال، با ساختار تک مد طولی در مد عرضی TEM₀₀ می‌باشد. پهنای تپ حدوداً ۳۰ نانو ثانیه و انرژی خروجی حدود ۱۳ میلی ژول می‌باشد [۲۳، ۲۷]. واگرایی باریکه لیزری ۰٫۴۳ mrad از دو تقویت‌کننده با محیط فعال Nd:YAG برای تقویت تپ لیزر تا انرژی ۶۰ میلی ژول استفاده شده است. باریکه لیزری با قطبش دایروی، توسط قطبش‌گر گلن-تامسون (GT) و یک تیغه ربع موج ایجاد و توسط یک عدسی مثبت درون سلول SBS کانونی می‌گردد. موج استوکس بازگشتی با عبور از تیغه ربع موج (QWP)، با قطبشی خطی عمود بر قطبش اولیه از قطبی‌کننده گلن-تامسون (GT_۲) به بیرون هدایت می‌شود. تپ نوسانگر و تپ استوکس برگشتی از سلول به کمک دو آشکارساز نوری سریع (FPD) با زمان خیزش ۰٫۱ ns و یک اسیلوسکوپ دیجیتال سریع Tektronix با پهنای باند ۵۰۰ MHz و آهنگ داده‌گیری ۵ GS/s آشکارسازی می‌شود. آشکارسازهای نوری استفاده شده نسبت به هم کالیبره شده و پهنای زمانی یکسانی را اندازه‌گیری می‌نمایند. اندازه‌گیری هم‌زمان تپ استوکس و تپ نوسانگر امکان محاسبه میزان فشردگی برای هر تپ را می‌دهد و از خطای آزمایش می‌کاهد.

۲. تئوری و معادلات حاکم

به عنوان یادآوری اشاره می‌کنیم که پراکندگی القایی بریلوئن با برهم‌کنش غیرخطی باریکه لیزری پر شدت ناشی از نوسانات ضریب شکست محیط به وجود می‌آید. حل معادلات حاکم بر پراکندگی القایی بریلوئن در حالت پایدار^۱ با صرف نظر از جذب و فروافت موج پمپ درون محیط معادله (۱) به‌دست خواهد آمد:

$$I_S(L) = I_S(0) \exp(g_B I_P L) \quad (1)$$

که در آن L طول برهم‌کنش یا طول سلول است هنگامی که موج استوکس از انتهای سلول تشکیل گردد، g_B ضریب بهره بریلوئن، I_P شدت باریکه پنجره ورودی و I_S شدت باریکه استوکس می‌باشد. اولین توصیف‌های فیزیکی فرایند فشردگی به واسطه پراکندگی القایی با تقریب موج تخت ارائه شده‌اند [۲۵، ۲۶] و نشان داده شده که اگر پهنای تپ لیزر (t_P) کم‌تر از زمان مورد نیاز برای عبور تپ از درون محیط باشد آن‌گاه بهره به صورت معادله (۲) خواهد بود:

$$G = \left(\sqrt{1 + g_B I_P \frac{C}{n} \tau} - 1 \right) \frac{t_P}{\tau} \quad (2)$$

در صورتی که $g_B I_P \frac{C}{n} \tau \gg 1$ پهنای زمانی لبه صعودی تپ پراکنده به صورت معادله (۳) خواهد شد:

$$t_{sle} \approx \frac{\tau}{\sqrt{g_B I_P \frac{C}{n} \tau}} = \frac{t_P}{G} \quad (3)$$

برای بررسی فشردگی تپ در تقریب امواج کروی در پراکندگی حالت گذرا در هندسه کانونی، دامنه مختلط میدان های لیزری و استوکس در مختصات کروی به صورت معادلات (۴) می‌توان نوشت:

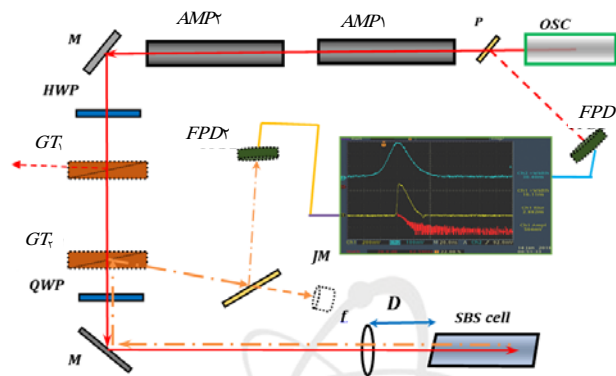
$$E_P e^{ikz} = \frac{A_P}{r} \exp(ikr) \quad (4)$$

$$E_S e^{-ikz} = \frac{A_S}{r} \exp(-ikr)$$

که r مختصه شعاع نسبت به نقطه کانون می‌باشد. بدین ترتیب با جای‌گذاری در معادلات پراکندگی القایی بریلوئن مقدار زمان لبه صعودی در پنجره ورودی به صورت معادله (۵) خواهد بود:

$$t_{sle}(r) \approx \frac{\tau}{\sqrt{1 + (g_B |A_p|^2 (C/n) \tau) / (r_1 r_2) - 1}} = \frac{t_P}{G} \quad (5)$$





شکل ۱. چیدمان اپتیکی آزمایش: OSC: نوسانگر حلقوی تک مد طولی و تک مد عرضی، Plate: تیغه شیشه‌ای پولیش شده با کیفیت سطح $\lambda/2$: AMP1: تقویت‌کننده اول، AMP2: تقویت‌کننده دوم، M: آینه تمام بازتابان در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، HWP: تیغه نیم‌موج، GT1 و GT2: قطبش‌گر گالن تامسون، QWP: تیغه ربع موج JM: کالری متر، FPD1 و FPD2: آشکارساز نوری‌های سریع، f عدسی مثبت و SBS-cell: سلول پراکننده حاوی استون خالص با درجه خلوص ۹۹٫۹۸٪.

جدول ۱. پارامتر فیزیکی مورد نیاز برای استون به عنوان ماده پراکننده

U_B (GHz)	τ_B (ns)	g_B (cm/GW)	ρ_s (g/cm ³)	n	λ (nm)	استون
۲٫۶۷	۲	۲۰	۰٫۷۹۰	۱٫۳۶	۱۰۶۴	

تغییر فاصله D با ملاحظه و رویکرد الف) جلوگیری از آسیب دیدگی پنجره‌های ورودی در شدت‌های بالا و ب) کاهش اثرات غیرخطی ثانویه در سلول انجام پذیرفت.

۴. تحلیل و بررسی نتایج

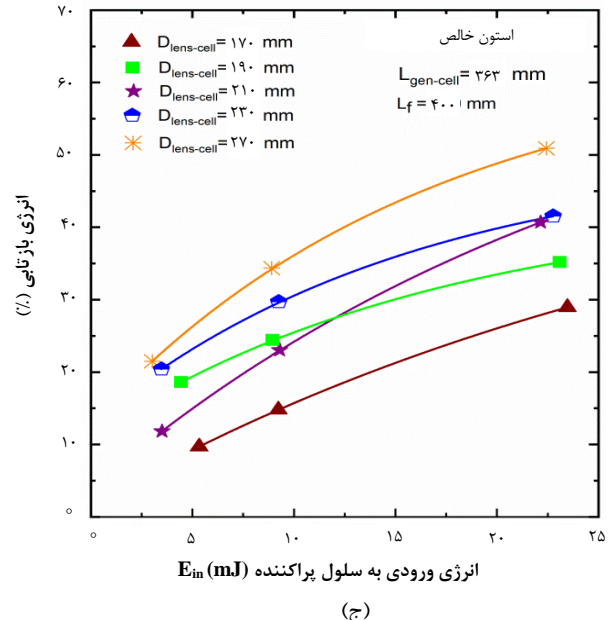
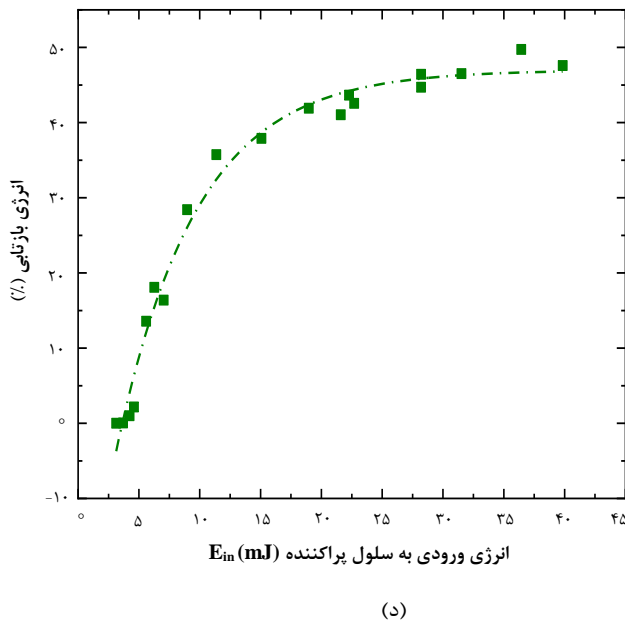
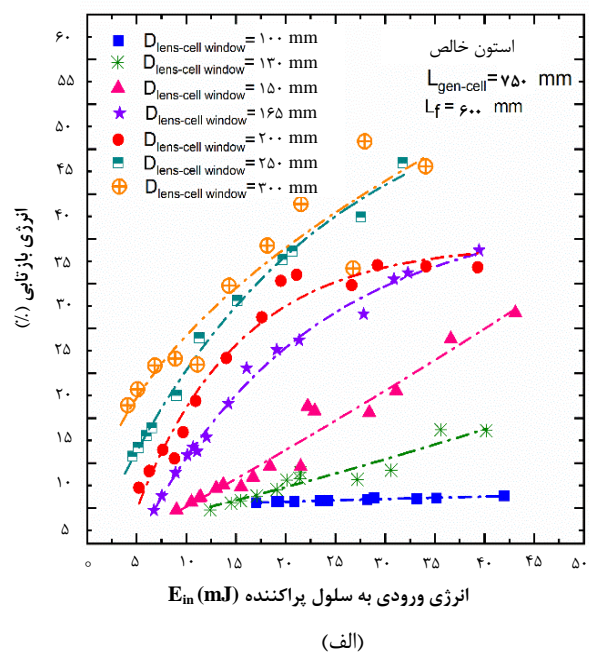
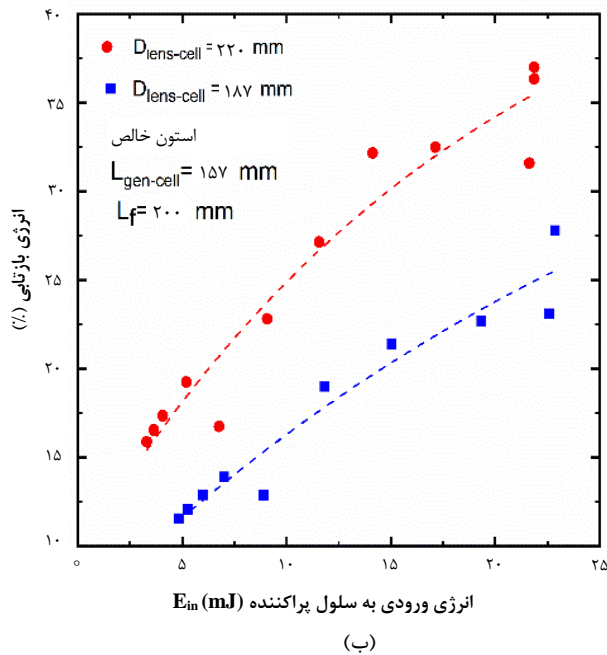
رفتار انرژی بازتابی از تک سلول SBS با طول‌های ۱۵۷، ۳۶۳ و ۷۵۰ میلی‌متر به ترتیب در شکل ۲ الف، ب و د برحسب انرژی ورودی به سلول به ازای فواصل مختلف عدسی همگرا کننده و پنجره ورودی سلول رسم شده است. فاصله کانونی عدسی و فاصله آن با پنجره ورودی به سلول (D) درون هر نمودار آورده شده است.

در شکل ۲ الف، رفتار انرژی بازتابی برای سلولی به طول $L = 750 \text{ mm}$ و عدسی با فاصله کانونی $L_f = 600 \text{ mm}$ در فواصل متفاوت $D = 100-300 \text{ mm}$ در بازه انرژی $E_{incell} = 3-45 \text{ mJ}$ ترسیم شده است. شکل ۲ ب، رفتار کلی انرژی بازتابی سلول با طول $L = 157 \text{ mm}$ و $L_f = 200 \text{ mm}$ ، شکل ۲ ج، مربوط به سلولی به طول $L = 363 \text{ mm}$ و $L_f = 400 \text{ mm}$ می‌باشد. در شکل ۲ د، رفتار انرژی بازتابی را برای طول $L = 363 \text{ mm}$ برای فاصله $D = 215 \text{ mm}$ ، به منظور تطابق نتایج آزمایش‌ها با تئوری SBS و کارهای دیگران در بازه بزرگ‌تری از انرژی آورده شده است.

بخشی از انرژی تپ استوکس، با عبور از قطعات اپتیکی تلف می‌شود با استفاده از ضرایب عبوردهی قطعات مقدار انرژی بازتابی در خروجی سلول محاسبه گردیده است. ضریب عبوردهی تیغه شیشه‌ای و تیغه ربع موج $T_1 = 91\%$ و قطبش‌گر گالن- تامسون $T_{GT} = 75\%$ به دست آمده است. ضریب عبوردهی کل برابر با $T = T_1 \times T_{GT} \times T_1 = 62.5\%$ خواهد شد. در پژوهش پیش‌رو از ساختار تک سلولی مولد SBS، با سلولی حاوی استون خالص ۹۹٫۹۸٪ با ضریب بهره بریلوئن $g_B = 20 \text{ cm/GW}$ به عنوان ماده پراکننده و باریکه لیزری قطبیده در هندسه کانونی برای فشردگی تپ مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۱ پارامترهای فیزیکی مورد نیاز برای استون ارائه شده است.

به منظور بررسی اثر شدت ورودی به سلول و تغییر طول برهم‌کنش در نتایج حاصل از اثر پراکندگی القایی بریلوئن در انرژی بازتابی و پهنای زمانی تپ، از سه سلول با غلاف شیشه‌ای به طول‌های ۱۸۷، ۲۶۳ و ۷۵۰ میلی‌متر و قطر دهانه ورودی ۱۴ میلی‌متر استفاده شد. از آنجایی که در هندسه کانونی، باریکه لیزری توسط یک عدسی همگرا به نحوی که شدت در انتهای سلول به آستانه بریلوئن برسد کانونی شده و طی فرایند پراکندگی القایی بریلوئن دامنه موج مزدوج تولیدی در اندرکنش با موج فرودی و توری صوتی، تقویت می‌شود لذا متناسب با طول سلول از سه عدسی با فواصل کانونی ۱۵۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر استفاده گردید. با افزایش (و یا کاهش) فاصله بین عدسی تا دهانه ورودی سلول D شار انرژی فرودی به سلول افزایش (کاهش) پیدا می‌کند لذا اثر شدت ورودی به سلول در انرژی ثابت تغییر خواهد نمود، هم‌چنین مکان تولید باریکه استوکس درون سلول متغیر خواهد شد لذا طول برهم‌کنش کاهش (افزایش) خواهد یافت. بدین‌روش ترکیب اثر شدت ورودی و طول برهم‌کنش به عنوان یک پارامتر $I_p \times L_{int}$ مورد بررسی قرار می‌گیرد.



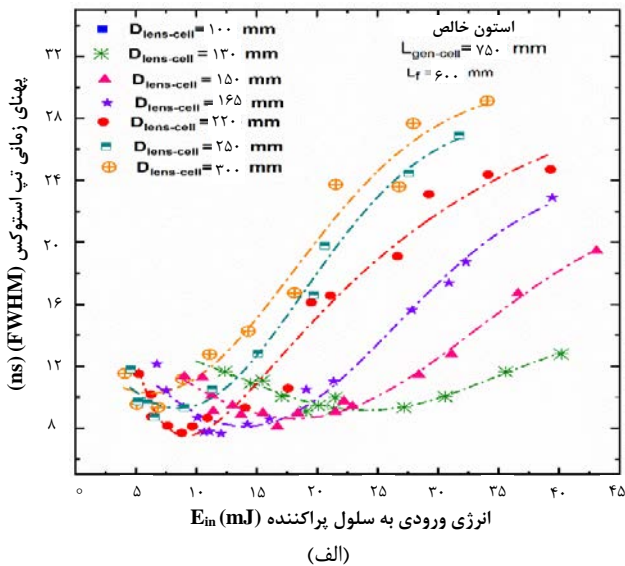


شکل ۲. رفتار انرژی بازتابی برای سلول به طول الف) ۷۵۰ mm، ب) ۱۵۷ mm، ج) ۳۶۳ mm برحسب انرژی ورودی به سلول به ازای فواصل مختلف عدسی تا سلول نشان داده شده است (د) به ازای فاصله $D = 215$ میلی‌متر می‌باشد.

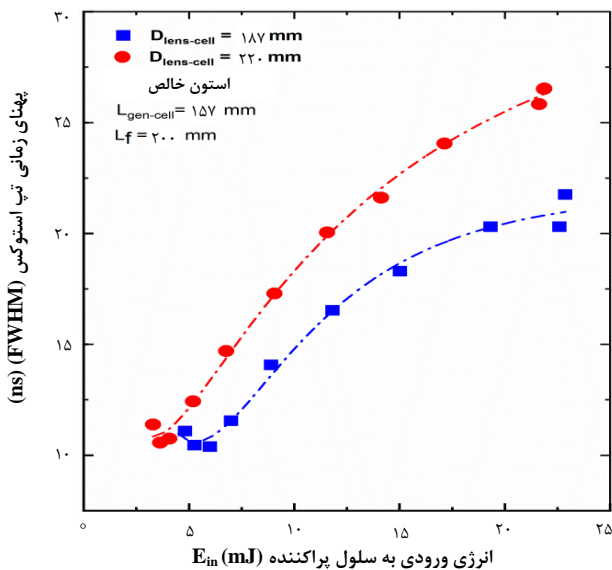
بدین ترتیب با افزایش فاصله D سطح مقطع باریکه ورودی به سلول کاهش و شدت انرژی در پنجره ورودی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش انرژی ورودی نیز منجر به افزایش شدت می‌شود، بنابراین با توجه به معادله (۱) ضریب بازتاب انرژی افزایش می‌یابد. نظر به استفاده از هندسه کانونی، آستانه پراکندگی القایی در مکانی نزدیک‌تر به دهانه ورودی ایجاد و منجر به کاهش طول برهم‌کنش نیز می‌شود. مقایسه نتایج به دست آمده از شکل‌های ۲ برای سه سلول با طول‌های مختلف، نشان‌دهنده تأثیر طول سلول در میزان انرژی بازتابی می‌باشد.

در تمامی نمودارهای ترسیم شده در شکل ۲، رفتار ضریب بازتابش انرژی به صورت نمایی با افزایش انرژی ورودی به سلول به ازای مقادیر مختلف D تا مقدار مجانبی افزایش می‌یابد. دقت در این نمودارها نشان می‌دهد افزایش فاصله عدسی تا سلول (D) منجر به افزایش انرژی پراکنده شده و در نتیجه افزایش بازدهی سلول SBS می‌گردد. به عنوان مثال شکل ۲ الف، افزایش انرژی بازتابی از ۹٪ تا ۵۰٪ در انرژی فرودی $E_{in} = 40$ mJ مشاهده می‌شود. این رفتار برای تمامی سلول‌ها با طول‌های مختلف مشاهده می‌گردد.

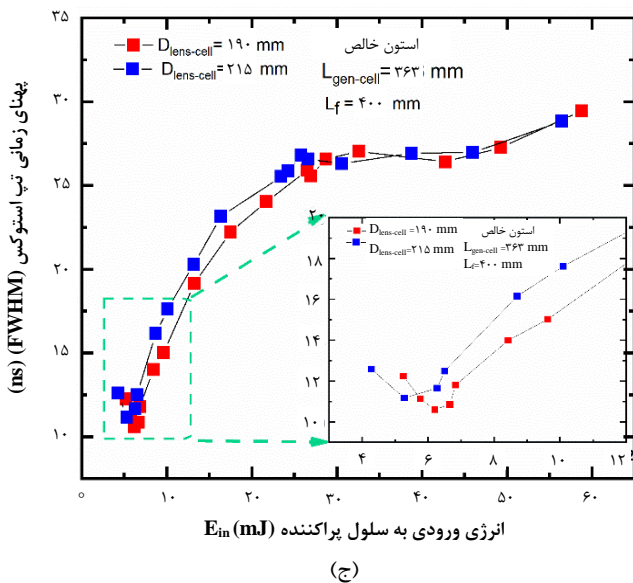




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. تغییرات پهنای تپ استوکس برحسب انرژی ورودی به سلول برای سلولی به طول ۷۵۰ mm حاوی استون خالص با فواصل مختلف عدسی تا سلول.

از طرف دیگر با دقت در نمودارها می‌توان دریافت که مقدار انرژی بازتابی در فواصل بزرگتر معادل با انرژی بازتابی در فواصل کوچک‌تر ولی با انرژی دمشی بیشتر می‌باشد. در افزایش فاصله باید برخی از نکات را مد نظر قرار داد، الف) افزایش بیش تر فاصله D ، منجر به تشکیل کمر باریکه در نزدیکی پنجره ورودی شده و احتمال تخریب سطحی پنجره را افزایش می‌دهد، ب) با کاهش طول برهم‌کنش کیفیت فضایی باریکه کاهش می‌یابد. لذا با توجه به موارد ذکر شده و معادله حاکم بر فرایند SBS طبق معادله (۱) مجموعه طول برهم‌کنش و انرژی لیزر ورودی $(I_p \times L_{int})$ وجود یک فاصله بهینه (D_{opt}) جهت دستیابی به بیشینه ضریب بازتاب را تقویت می‌کند.

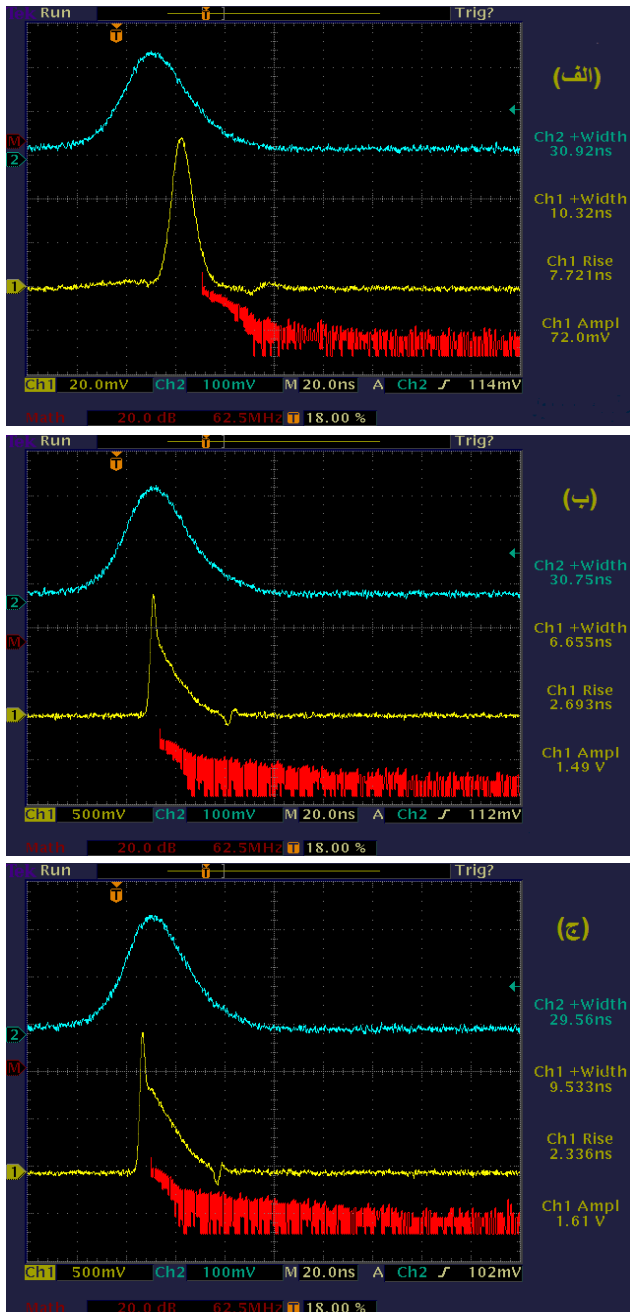
به منظور بررسی بهتر و منسجم‌تر از این به بعد تنها به بررسی داده‌های مربوط به سلول با طول $L = 750$ mm پرداخته و نتایج آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در شکل ۳ رفتار زمانی تپ استوکس برحسب انرژی ورودی به سلول SBS برای طول‌های الف) $L = 750$ mm، ب) $L = 157$ mm و ج) $L = 363$ mm ترسیم شده است. در هر نمودار در فواصل مختلف D روند تغییر پهنای زمانی تپ بازتابی برحسب انرژی ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش انرژی ورودی پهنای زمانی تا رسیدن به نقطه کمینه کاهش و سپس افزایش می‌یابد. نتیجه حاصل با تحقیقات زو و همکارانش [۳] که کمینه پهنای را در انرژی آستانه در نظر گرفته بودند مغایرت دارد. این فرایند در هر سه سلول با طول‌های مختلف مشاهده گردید. لذا با توجه به نتایج این پژوهش گامی در جهت کمینه‌سازی پهنای زمانی ارائه نموده است.

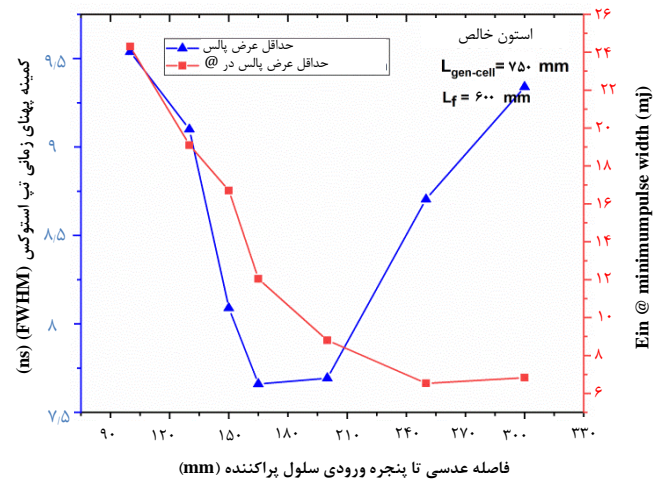
بررسی روند تأثیر فاصله عدسی تا پنجره ورودی در نمودارهای شکل ۳ نشان از وجود یک کمینه پهنای تپ برحسب فاصله دارد. در شکل ۳ الف، این کمینه حدوداً در فاصله $D = 165$ mm برای سلول به طول $L = 750$ mm رخ می‌دهد. به منظور مشاهده دقیق‌تر، رفتار کمینه پهنای تپ استوکس به ازای فواصل مختلف D در شکل ۴ (نمودار آبی رنگ با علامت \blacktriangle) نشان داده شده و نمودار میزان انرژی ورودی به سلول متناسب با کمینه پهنای تپ در (شکل ۴ نمودار آبی رنگ \blacksquare) ترسیم شده است. کمینه پهنای تپ استوکس با مقدار $t_s \approx 7.6$ ns برای فاصله $D = 165$ mm به ازای $E_{in,cell} = 12$ mJ به دست آمده است. البته پهنای تپ در فاصله $D = 200$ mm نزدیک به نقطه کمینه می‌باشد با این تفاوت که در انرژی ورودی کمتر $E_{in,cell} = 8.5$ mJ رخ داده است.



در تحلیل نتایج می‌توان اظهار داشت که روند کاهش انرژی در کمینه پهنای زمانی با افزایش فاصله به دلیل افزایش شدت می‌باشد اما نقطه کمینه پهنای زمانی به واسطه عامل دوم یعنی طول بهینه اندرکنش ایجاد می‌گردد. با توجه به نتایج به دست آمده اثر حاصل ضرب شدت در طول برهم‌کنش ($I_p \times L_{int}$) نقش اساسی در فشردگی تپ خواهد داشت.



شکل ۵. تصاویر ثبت شده از پهنای زمانی تپ خروجی از نوسانگر (نمودار آبی و بالا) استوکس (زرد وسط) و تبدیل فوریه تپ استوکس (پایین قرمز) به ازای فواصل مختلف عدسی تا سلول، (الف) ۱۳۰ میلی‌متر، (ب) ۱۶۵ میلی‌متر و (ج) ۲۰۰ میلی‌متر برای سلول به طول ۷۵۰ میلی‌متر.



شکل ۴. نمودار کمینه پهنای تپ برحسب فاصله بین عدسی تا دهانه ورودی سلول (نمودار آبی رنگ با علامت ▲) و انرژی لازم برای تولید تپ استوکس کمینه (نمودار قرمز رنگ با علامت ■).

در شکل ۵ تصاویر ثبت شده از اندازه‌گیری تپ استوکس برای سلول به طول ۷۵۰ میلی‌متر در فواصل $D = 130 - 165 - 200 \text{ mm}$ به ازای انرژی ورودی به سلول در حدود $E_{incell} = 14 \text{ mJ}$ به منظور درک بهینه‌سازی پهنای تپ با فاصله نشان داده شده است. نمودار بالایی (با رنگ آبی) تپ خروجی از نوسانگر، نمودار وسط (زرد رنگ) تپ استوکس بازگشتی و نمودار قرمز رنگ تبدیل فوریه تپ استوکس را همراه با اطلاعات مربوط به دامنه تپ لیزر و پهنای زمانی و زمان خیزش و دامنه تپ استوکس به ترتیب برای شکل ۵ الف، ب و ج نشان داده شده است. همچنین با افزایش شدت در دهانه ورودی سلول، انتقال انرژی به لبه صعودی تپ استوکس افزایش و تولید تپهای با قله توان بیشتر رخ داده است.

مقایسه نتایج به دست آمده از شکل‌های ۲ و ۳ برای سه سلول با طول‌های مختلف، نشان‌دهنده تأثیر طول سلول در میزان انرژی بازتابی و پهنای زمانی تپ می‌باشد. با افزایش طول سلول بیشینه انرژی بازتابی افزایش و پهنای تپ خروجی کاهش پیدا می‌کند. با تعیین مقدار بهینه انرژی و فاصله D برای هر سلول با طول دلخواه، می‌توان کمینه پهنای زمانی را به دست آورد و سپس به تقویت آن پرداخت. همچنین با توجه به شکل‌های ۲ تا ۴ می‌توان دریافت که فاصله بین عدسی تا سلول (D) و طول سلول به عنوان عوامل ساختار هندسی پراکندگی القایی بریلوتن و به عنوان پارامتری تأثیرگذار در تعیین و کنترل میزان انرژی بازتابی و کنترل پهنای زمانی تپ خروجی، قابل توجه هستند.



۵. نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه تأثیر تغییرات شدت ورودی به سلول به واسطه تغییر در ساختار هندسی سلول در پراکندگی القایی بریلوئن در هندسه کانونی پرداخته شده است. نتایج به ازای تغییر در طول هندسی سلول و فاصله عدسی تا دهانه ورودی سلول که منجر به تغییر شدت ورودی در انرژی ثابت خواهد شد، مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد نظر به استفاده از هندسه کانونی، افزایش شدت ورودی به سلول با افزایش انرژی و یا افزایش فاصله عدسی تا سلول (D) که با کاهش سطح مقطع باریکه ورودی به درون سلول همراه است، منجر به افزایش ضریب بازتابش از سلول SBS می‌گردد. این رفتار برای سلول‌هایی با طول متفاوت مشاهده شد. افزایش فاصله D دارای محدودیت‌های کاهش کیفیت فضایی و امکان ایجاد تخریب سطحی قطعات اپتیکی با تشکیل کمر باریکه در نزدیکی پنجره ورودی می‌باشد. هم‌چنین پهنای زمانی تپ بازگشتی با افزایش انرژی تا یک مقدار کمینه کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد، به منظور دستیابی به کمینه پهنای تپ، علاوه بر طول سلول می‌بایست شدت انرژی ورودی برحسب ساختار هندسی برهم‌کنش، و طول برهم‌کنش را در نظر گرفت. کمینه پهنای به واسطه دو عامل شدت ورودی به سلول و طول بهینه اندرکنش ایجاد می‌گردد. با توجه به نتایج به‌دست آمده اثر حاصل ضرب شدت در طول برهم‌کنش ($I_p \times L_{int}$) به عنوان یک پارامتر می‌تواند نقش اساسی در فشردگی تپ داشته باشد. بنابراین برای هر سلول مولد عوامل ساختار هندسی پراکننده بریلوئن در کنترل انرژی بازتابی و تنظیم پهنای زمانی تپ خروجی، به عنوان پارامتری مؤثر می‌باشد.

مراجع

1. M. Bertolotti, *High-order harmonic generation in laser plasma plumes*, by Rashid Ganeev: *Scope: Review. Level: Early career researcher, researcher, teacher, specialist*, Ed: Taylor & Francis, (2015).
2. T. Popmintchev, et al., *Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV x-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers*, *Science*, **336**, 1287-1291 (2012).
3. X. Xu, C. Feng, J.-C. Diels, *Optimizing sub-ns pulse compression for high energy application*, *Optics Express*, **22**, 13904-13915 (2014).
4. A.Y. Okulov, *Coherent chirped pulse laser network with Mckelson phase conjugator*, *Applied Optics*, **53**, 2302-2311 (2014).
5. E. Garmire, *Stimulated Brillouin review .invented 50 years ago and applied today*, *International Journal of Optics*, **2018** (2018).
6. V.I. Kovalev, R.G. Harrison, *On the material response in stimulated Brillouin scattering*, *Physics Letters A*, **375**, 2581-2584 (2011).
7. A. Brignon, J.-P. Huignard, *Phase conjugate laser optics*, **9**, Wiley. Com, (2004).
8. T. Hatae, et al, *Applications of phase conjugate mirror to Thomson scattering diagnostics*, *Review of Scientific Instruments*, **77**, 10E508 (2006).
9. T. Omatsu, et al., *The current trends in SBS and phase conjugation*, *Laser and Particle Beams*, **30**, 117-174 (2012).
10. H. Kong, et al, *Beam combined laser fusion driver using stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirrors*, (2008).
11. M. Ostermeyer, et al., *Trends in stimulated Brillouin scattering and optical phase conjugation*, *Laser and Particle Beams*, **26** (2008).
12. T. Omatsu, et al., *The Current Trends in SBS and phase conjugation*, *Laser and Particle Beams*, **30**, 117-174 (2012).
13. S. Schiemann, W. Ubachs, W. Hogervorst, *Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier setup*, *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, **33**, 358-366 (1997).
14. Y. Zhu, et al, *Threshold reduction of stimulated Brillouin scattering by Stokes seeds via acousto-optic effect*, *Optics Communications*, **281**, 4523-4525 (2008).
15. J.-w. Shi, et al, *Theoretical investigation on the threshold value of stimulated Brillouin scattering in terms of laser intensity*, *Applied Physics B*, **95**, 657-660 (2009).
16. B. Steinhäusser, et al, *High Energy, Single-Mode, Narrow-Linewidth Fiber Laser Source with Stimulated Brillouin Scattering Multimode to Single Mode Beam Converter*, *Fiber and Integrated Optics*, **27**, 407-421 (2008).



17. C. Feng, X. Xu, J.-C. Diels, *High-energy sub-phonon lifetime pulse compression by stimulated Brillouin scattering in liquids*, *Optics Express*, **25**, 12421-12434 (2017).
18. C. Feng, X. Xu, J.-C.M. Diels, *Generation of 300 ps laser pulse with 1.2 J energy at 532 nm by stimulated Brillouin scattering in water*, *In CLEO: Science and Innovations, SM2F.7* (2014).
19. W. Hasi, et al., *Characteristics of SBS hundreds picosecond pulse compression and influence of energy on pulse stability in FC-770*, *Optics Communications*, **311**, 375-379 (2013).
20. H. Yuan, et al., *Fluctuation initiation of Stokes signal and its effect on stimulated Brillouin scattering pulse compression*, *Optics Express*, **25**, 14378-14388 (2017).
21. M. Damzen, M. Hutchinson, *High-efficiency laser-pulse compression by stimulated Brillouin scattering*, *Optics Letters*, **8**, 313-315 (1983).
22. M. Jaber, A. Farahbod, H.R. Soleimani, *Spectral behavior of amplified back-scattered Stokes pulse in two-cell phase conjugating mirror*, *Optics Communications*, **335**, 7-15 (2015).
23. M. Jaber, A.H. Farahbod, H. Rahimpur Soleimani, *Spectral behavior of phase conjugated mirror in a two-pass optical amplifier*, *Iranian Journal of Physics Research*, **15**, 71-79 (2015).
24. M. Jaber, et al, *Investigation of Energy Flux effect on the reflected pulse width from phase conjugate mirror based on stimulated Brillouin scattering*, *Iran Physics Conference 1398* (2019).
25. G. Kachen, W. Lowdermilk, *Relaxation oscillations in stimulated Raman scattering*, *Physical Review A*, **16**, 1657 (1977).
26. V.I. Bespalov, G.A. Pasmanik, *Nonlinear optics and adaptive laser systems*, *Moscow Izdatel Nauka*, (1986).
27. M. Jaber, A. Farahbod, H. Rahimpur Soleimani, *Longitudinal mode structure in a non-planar ring resonator*, *Iranian Journal of Physics Research*, **13**, 35-44 (2013).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

محمد جابری، سمیه پناهی‌بخش، پگاه جمشیدی، اکبر نظری گلشن (۱۴۰۱)، اثر تغییر طول سلول و شدت انرژی ورودی بر پراکندگی القایی بریلوئن در ساختار تک سلولی،

۱۰۱، ۱۶۳-۱۷۱

DOI: 10.24200/nst.2022.1458

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1458.html