بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد

بررسی پایداری تقویت کننده بازتولیدگر پالس فوق کوتاه

مهنا نجفی،آرزو سپهر، سید علاء هاشمی گلپایگانی

مرکزملی‌علوم وفنون لیزر ایران،تهران،ایران،صندوق پستی۵۷۶-۱۴۶۶۵

چکیده–درپژوهشپیش‌رو نحوه عملکرد و پایداری سیستم تقویت کننده بازتولیدگر با محیط فعال *Nd:YVO4* را مورد بررسی قرار می-دهیم. نتایج حل عددی معادلات حاکم بر مسئله در نرخ تکرار بالا (چند ده کیلو هرتز) در برخی موارد اختلالات متناوبی در انرژی پالس خروجی تقویت کننده نشان می‌دهد. به منظور رسیدن به انرژی بهینه و پایدار، نواحی ناپایداری تقویت کننده بازتولیدگر بر حسب پارامترهای تاثیر گذار سیستم تعیین شده است. در این بین بر نقش موثر انرژی پالس اولیه در تعیین محدوده پایداری تقویت کننده-بانرختکرارهای بالا و بالعکس نقش ضعیف آن در سیستم‌های با نرخ تکرار پایین تاکید شده است.

کلید واژه- تقویت کننده بازتولیدگر، لیزر قفل مد، نواحی پایداری ، نرخ تکرار ، .Nd:YVO4

Dynamics of Regenerative Amplifier for ultrashort pulses

MohannaNajafi, ArezueSepehr, S. AlaHashemiGolpaygani

Iranian National Centre for laser science and technology (INCL), Tehran, Iran,

PO Box: 14665-576

Abstract- investigation of dynamics and stability of Cw pumped Nd:YVO4 regenerative amplifier has been presented In this paper. At high repetition rate,the train of output pulses experiences periodic energy disturbance. In order to stabilize regenerative amplifier, stability zone due to system parameters has been specified. Among these parameters the key role of seed energy in stability of regenerative amplifier at high repetition rate has beendemonstrated.

Keywords: Regenerative amplifier Stability zone, Repetition rate, Nd:YVO4

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

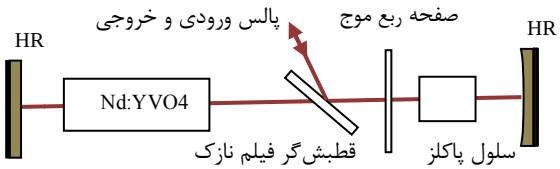
۱- مقدمه

امروزه اقبال گسترده‌ای در بخش‌های مختلف صنعتی،انرژی و تحقیقاتی به مقوله پالس‌های فوق کوتاه پر انرژی شده است.نیاز به تولید پالس‌های با انرژی بالا (تا محدوده چند صد میلی ژول) لزوم استفاده از تقویت کننده‌های مختلف پالس‌های فوق کوتاه را آشکار می‌کند. تقویت کننده بازتولیدگر از جمله تقویت کننده‌های پرکاربرد در این زمینه است، که به نسبت رقیب اصلیشیعنی تقویت کننده چند عبوری دارای مزایایی از جمله پایداری پالس خروجی، کیفیت پرتو و کاهش اثر ASE می‌باشد[۱].

در این مقاله به ارائه مدل سازی عددی سیستم تقویت کننده بازتولیدگر برایلیزر قفل مدی Nd:YVO4 می-پردازیم. در ابتدا با حل عددی معادلات دیفرانسیل جفت شده سیستم لیزر، ویژگی‌های پالس خروجی بدست می-آید. سپس به منظور طراحی بهینه تقویت کننده نواحی ناپایداری پالس خروجی بر حسب سه پارامتر تاثیر گذار نرخ تکرار، تعداد رفت و برگشت پالس در کاواک و انرژی پالس اولیه تعیین می‌شود.

۲- مشخصات سیستم

عملکرد یک تقویت کننده بازتولیدگر شباهت زیادی به لیزر کلیدزنی به روش کاواک انباشت دارد[۲]. شماتیکی از کاواک تقویت کننده بازتولیدگر را در شکل ۱ مشاهده می‌کنیم. این سیستم تشکیلیافته از ماده فعال Nd:YVO4 با دمش پیوسته بوسیله لیزر دیود و یک بستار الکترواپتیک که خود شامل یک سلول پاکلز BBO، یک صفحه ربع موج، یک قطبشگر فیلم نازک و دو آینه بازتاب کامل است. پالس ورودی از یکلیزر قفل مدی توسط یک قطبش‌گرفیلم نازک به مجموعه تقویت کننده بازتولیدگر هدایت می‌شود. این پالس پس از رفت و برگشت‌های مشخص درون کاواک و عبور مکرر از درون ماده بهره تقویت شده و با اعمال مکانیزم تغییر قطبش در همان مسیر ورودی از کاواکخارج می‌شود. مراحل تقویت پالس در تقویت کننده بازتولیدگر از دو مرحله دمش و تقویت تشکیل شده است. در مرحله اول کریستال فعال در حال دمش و ذخیره انرژی است و از رفت و برگشت پالس درون کاواک خودداری می‌شود.



شکل ۱: شماتیک کاواک یک تقویت کننده بازتولیدگر

در مرحله تقویت پس از ذخیره سازی انرژی در ماده فعال، پالس با اعمال ولتاژ به سلول پاکلز وارد کاواک شده و اصطلاحا در کاواک گیر می‌افتد. پس از چندین مرحله رفت و برگشت پالس به بیشترین میزان تقویت خود رسیده و با تغییر قطبش،به بیرون از کاواک هدایت می-شود.

یکی از عوامل مهم در طراحی تقویت کننده بازتولیدگر، پایداری مشخصه‌های خروجی سیستم است. ماده فعال با آلاینده نئودینیوم به دلیل داشتن طول عمر بالای تراز لیز سبب تشکیل جمعیت وارون قابل توجهی در حین دمش پیوسته با لیزر دیود می‌شود،بنابراین گزینه مناسبی برای استفاده در تقویت کننده بازتولیدگر بشمار می‌رود. با این حالاین ویژگی (زمان فرو افت طولانی) می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری در خروجی تقویت کننده با نرخ تکرار بالا شود. هنگامی که زمان فروافت تراز بالایی لیز قابل مقایسه با یک دوره روشن و خاموشی سلول پاکلز باشد، خروجی تقویت کننده از رژیم‌های تناوبی متفاوتی تبعیت می‌کند. بگونه‌ای که با تغییر پارامترهای مستقل سیستم، انرژی پالس‌های خروجی تناوبا دو یا چند مقدار به خود گرفته و حتی در برخی موارد شکل کاملا بی‌نظمی می‌یابند. بر طبق آنچه تا کنون آورده شد ارائه تصویر کلی از شرایط و نواحی پایداری سیستم تقویت کننده از ضروریات طراحی بهینه آن محسوب می‌شود.

۳- مدل سازی عددی

به منظور بررسی شرایط و پارامترهای اصلی تاثیرگذار بر روی پایداری عملکرد تقویت کننده بازتولیدگر، مدل‌سازی عددی سیستم را بر پایه حل معادلات نرخ در پیش می-گیریم. همانطور که گفته شد سیستم تقویت کننده بازتولیدگر شباهت زیادی به لیزر کلیدزنی به روش کاواک انباشت دارد. از اینرو در شبیه سازی این سیستم نیز به

حل عددی معادلات نرخ به همراه تغییراتی که برآمده از شرایط تقویت کننده بازتولیدگر است می‌پردازیم. معادلات نرخ بکار رفته برای ماده فعال Nd:YVO4 به عنوان یک سیستم چهار ترازی به صورت زیر است [۳]:

$$\frac{dn}{dt} = R_p - \frac{n(t)}{\tau_f} - c\,\sigma\,n(t)Q(t) \qquad (۱)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{c\sigma\,l_a}{l_r}\phi(t)(n(t) - n_{th}) \qquad (۲)$$

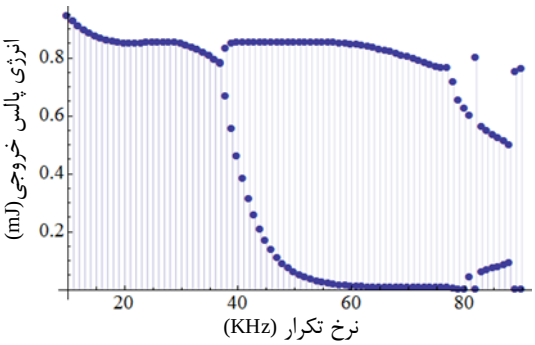
$$n_{th} = \frac{1}{2\,\sigma l_a}(-ln(1-L)^2 + \xi) \qquad (۳)$$

که در آن n متوسط چگالی جمعیت وارون، ϕ متوسط چگالی فوتون‌های درون کاواک، R_p نرخ دمش و τ_f زمان فرو افت خود بخودی است. همچنین σ سطح مقطع گسیل القایی، l_a طول میله Nd:YVO4، l_r طول کاواک و c سرعت نور می‌باشد. در رابطه (۳) n_{th} متوسط چگالی جمعیت وارون در آستانه است. جمله اول در این رابطه میزان تلفات داخلی در کاواک و ξ میزان تلفات مربوط به بستار کلید زنی است. از آنجایی که آینه ها در کاواک انباشت بازتابنده کامل هستند، تلفات مربوط به آنها از معادلات حذف می‌شود. ورود پالس اولیه از خارج کاواک تقویت کننده را بصورت شرایط اولیه در مرحله تقویت وارد معادلات می‌کنیم.

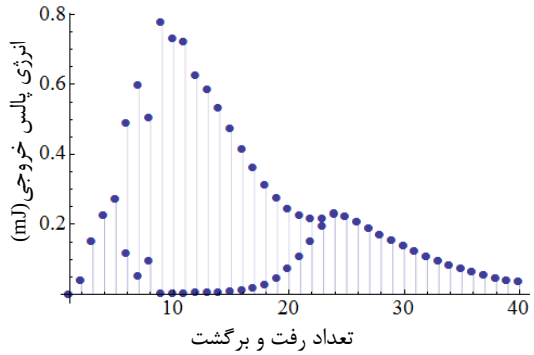
برای محاسبه انرژی پالس تقویت شده کافیست چگالی جمعیت وارون را در انتهای مرحله تقویت از معادلات نرخ استخراج کنیم. روش کار بدین صورت است که معادلات نرخ را در بازه زمانی دمش حل کرده نتایج بدست آمده را به عنوان شرایط اولیه بازه تقویت در معادلات لحاظ کنیم و با حل مجدد معادلات، انرژی نهایی پالس خروجی و همچنین مقدار بهره را بدست آوریم.نتایج بدست آمده در این مرحله برای محاسبه تقویت یک تک پالس است. با توجه به اینکه پس از خروج پالس قبلی مرحله دمش پالس بعدی آغاز می‌شود لازم است معادلات سیستم را متناوبا با استفاده از شرایط بدست آمده در مرحله قبل برای هر مرحله محاسبه کنیم. بدین ترتیب پس از هر دوره دوگانه دمش و تقویت،یک پالس تقویت شده با مشخصات تعیین شده داریم.برای بررسی پایداری سیستم، با تکرار مراحل دوگانه دمش و تقویت در طول زمان،قطار پالس خروجی تقویت شده بدست می‌آید. مشاهده می‌شود به ازای برخی شرایط اولیه انرژی پالس تقویت شده ثابت نبوده با این‌حال تغییراتش از نظم خاصی پیروی می‌کند. با حذف کمیات وابسته در معادلات به چند پارامتر مستقل و اصلی که تعیین کننده نظام خروجی سیستم هستند می‌رسیم. این پارامترها عبارتند از:انرژی پالس اولیه، میزانتلفات داخلی، نرخ تکرار و تعداد رفت و برگشت پالس درون کاواک[۴]. شبیه سازی انجام شده برای تعیین نواحی ناپایداری سیستم،هربار با تغییر دو پارامتر و ثابت گرفتن بقیه مشخصات، با چند صد بار تکرار مراحل ذکر شده صورت پذیرفته است.

۴- نتایج شبیه سازی

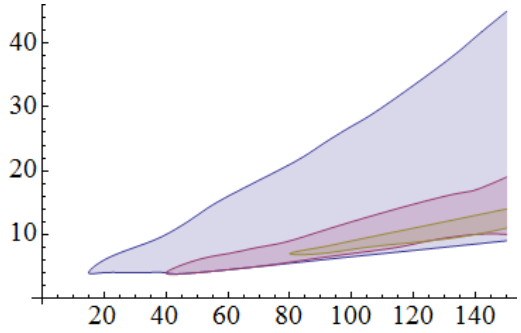
دو کمیت نرخ تکرار و تعداد رفت و برگشت پالس در کاواک از پارامترهای موثر در دینامیک تقویت کننده هستند که با تعیین بازه‌های زمانی مراحل دمش و تقویت (زمان‌بندی قطع و وصل ولتاژ سلول پاکلز) و طول کاواک مشخص می‌شوند.با توجه به اینکه بازه زمانی مرحله دمش نسبت به مرحله تقویت بسیار طولانی‌تر است، با افزایش نرخ تکرار پالس در واقع بازه دمش کوتاه‌ترمی‌شود. با کاهش زمان دمش، انرژیذخیره شده در کریستالقبل از اینکه به بیشینه مقدار قابل حصول خود برسد در میانه راه متوقف می‌شود. بنابراین مقدار بهره و به دنبال آن میزان تقویت پالس به زمان وابسته خواهند شد. بطور مشابه در مرحله تقویت نیز پالس ورودی با هر بار عبور از درون ماده فعال مقداری از انرژی ذخیره شده در ماده فعال را با خود همراه می‌کند. اگر تعداد عبور پالس کمتر از تعداد لازم برای رسیدن به انرژی بیشینه باشد انرژی دمش کاملا تخلیه نشده و شرایط مرحله بعد را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد.



شکل۲: تغییرات انرژی پالس خروجی برحسب نرخ تکرار. در این محاسبه انرژی پالس ورودی ۱nJ و تعداد رفت و برگشت درون کاواک ۱۰ مرتبه می‌باشد.



شکل۳: تغییرات انرژی پالس خروجی برحسب تعداد رفت و برگشت پالس در کاواک. در این محاسبه انرژی پالس ورودی ۱nJ و نرخ تکرار ۹۰KHz است.



شکل۴: نواحی ناپایداری تقویت کننده بازتولیدگر برحسب دو متغیر نرخ تکرار و تعداد رفت و برگشت به ازای پالس اولیه با سه انرژی ۱nJ ، ۰/۵μJ ، ۱μJ.

این اختلال در حضور یک پالس کم انرژی که قادر به تخلیه کامل انرژی دمش نیست تشدید می‌شود.بنابراین با افزایش نرخ تکرار و کاهش زمان تکرار پالس، بهره و انرژی مراحل متوالی از هم مجزا نبوده و بر روی یکدیگر تاثیرگذاشته وباعث ناپایداری سیستم می‌شوند. محاسبات انجام شده با هدف تعیین نواحی ناپایداری برحسب انرژی پالس اولیه،نرخ تکرار و همچنین تعداد رفت و برگشت(پالسدرونکاواک) است.

درابتداتغییرات انرژی پالس خروجی را برحسب نرخ تکرار با انرژی پالس ورودی ۱ نانو ژول و تعداد ثابت ۱۰ رفت و برگشت در کاواک، در شکل ۲ مشاهده می‌کنیم. در این محاسبات کریستال میله‌ای Nd:YVO4 با طول ۳ میلیمتر درمعرض دمش لیزر دیودی به توان ۸۰ وات قرار گرفتهاست. برای نرخ تکرارهای کوچکتر از ۵۸ KHz سیستمپایدار و خروجیآن تک مقداری است اما با افزایش نرخ تکرار خروجی سیستم ناپایدار شده و دو مقدار به خود می‌گیرد. مشابه این وضعیت را با تغییر تعداد رفت و برگشت در نرخ تکرار ثابت در شکل ۳ مشاهده می‌کنیم. همانطور که دیده می‌شود در نرخ تکرار ۹۰ KHz ناپایداری سیستم از ۵ مرتبه رفت و برگشتآغاز شده و تا ۲۴ مرتبهادامه دارد. این در حالیست که در خارج از این محدوده، انرژی پالس تقویت شده پایدار است. با تلفیق نتایج بدست آمده می‌توان به تعیین نواحی ناپایداری تقویت کننده بازتولیدگر برحسب انرژی پالس اولیه پرداخت. شکل ۴ نواحی ناپایداری تقویت کننده را به ازای پالس اولیه با انرژی‌های ۱nJ، ۰/۵μJ، ۱μJ نشانمی‌دهد. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد محدوده پایداری یک سیستم به انرژی پالس ورودی به تقویت کننده وابسته است. بنابراین در صورتی که انرژی پالس اولیه از میزان مشخصی بیشتر باشد پایداری تقویت کنندهبازتولیدگر در هر نرخ تکرار و با هر چند بار رفت و برگشت در درون کاواک قابل حصول است. اینرهیافتمهم بر لزوم افزایشتوان لیزرقفلمدیبرای دستیابی به پایداری تاکید می‌کند. در یک طرح جایگزین می‌توان با افزودن مراحل پیش تقویت، قبل از ورود پالس به تقویت کننده بازتولیدگر مشکل ناپایداری سیستم را برطرف کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با شبیه سازی عملکرد تقویت کننده بازتولیدگر، محدوده پایداری آن را بر حسب پارامتر هایتاثیر گذار سیستم بدست آورده‌ایم. نمودارهای پایداری ارایه شده انرژی پالس تقویت شده را در محدوده وسیعیاز نرخ تکرار (از ۱۰KHz تا ۹۰KHz) و همچنین در تعداد رفت و برگشت‌های متفاوت پالس از درون محیط فعال نمایش می‌دهند. مشاهده می‌شود که افزایش انرژی پالس اولیه عملکرد پایدارا سیستم را در نرخ تکرارهای مختلف تضمین می‌کند. با این روشطراحی و بهینه سازی تقویت کننده در شرایط مختلف مفروض قابل انجام است.

مراجع

[1] P. Georges and et al., "*High-efficiency multipass Ti: sapphire amplifiers for a continuous-wave single-mode laser*", Opt. Lett. 16, No. 3,(1991).

[2] M. Gifford, K.J. Weingarten,*"Diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier*", Opt. Lett. 17, 1788 (1992)

[3] W.Koechner, "*Solid-State LaserEngineering"*, springer, 2006

[4] M.Grishin,V.Gulbines, A. Michailovas,"*Dynomics of high repetition rate regenerative amplifiers*", Optics Express,. 15, Issue 15,(2007).