بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

افزایش نرخ تکرار پالس در لیزر قفل مد فیبری با واکوکی در مدولاسیون فرکانس

مریم کریمی[1]

[1] پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، انتهای خیابان کارگر شمالی ، تهران

چکیده – در این مقاله تاثیر واکوکی در لیزر قفل مد فیبری بررسی شد. افزایش فرکانس واکوکی از یک مقدار معین علاوه بر کاهش قله خروجی توان در لیزر، باعث ایجاد نوساناتی در خروجی می‌شود. همچنین افزایش پهنای باند فیلتر از یک حد مشخص کاهش توان خروجی و کیفیت نامطلوب پالس لیزری را در پی دارد. بنابراین بر اساس مشخصات لیزر قفل مد، فرکانس واکوکی و پهنای باند فیلتر باید به‌طور دقیقی تنظیم شود تا بیشینه توان خروجی با کیفیت مناسب پالس حاصل شود.

کلید واژه- لیزر قفل مد، واکوکی، نرخ تکرار پالس.

Pulse Repetition Rate Increases in Mode Locked Fiber Laser with Frequency Modulation Detuning

Maryam Karimi[1]

Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, AEOI, P.O. Box 14399-51113, Tehran, Iran,

mykarimi@aeoi.org.ir

Abstract- In this paper the effect of detuning investigated in the mode locked fiber laser. Increases of the detuning frequency from a certain amount cause to reduce the peak power and the creation of the fluctuation in the laser output, Also increase of the filter bandwidth from the limited value, cause to decreases the peak power and the appearance of fluctuation at the output of the laser. Thus, according to the characteristics of the mode locked laser, the detuning frequency and filter bandwidth must be adjusted to have the maximum output with the best quality in the mode locked laser.

Keywords: Mode Locked Laser, Detuning, Pulse Repetition Rate.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

لیزرهای قفل مد کاربردهای بسیاری در زمینه‌های مختلف مانند اندازه‌گیری‌های نوری، مطالعات زیستی، مخابرات نوری و صنعت دارند [۱]. در قفل مد فعال با استفاده از مدولاسیون فاز یا فرکانس، فقط مدهایی در کاواک انتشار می‌یابند که فرکانس آنها با فرکانس مدولاتور تنظیم باشد. عواملی مانند اثرات گرمایی باعث تغییر طول کاواک شده و زمان حرکت پالس در کاواک را تغییر می‌دهد در نتیجه لیزر از کوک فرکانسی خارج می‌شود [۲]. در صنعت از اثر واکوکی برای افزایش نرخ تکرار تولید پالس استفاده می‌شود. روش‌های دیگری نیز برای افزایش نرخ تکرار پالس در لیزرهای قفل مد وجود دارد که از آن می‌توان به اثر تالبوت زمانی Talbot effect (اختلاف زمانی) [۳ -۴]، تسهیم و جدا سازی نوری Optical Division Multiplexing: ODM [۵] و قفل مد فرکانسی مرتبه بالا [۶]، استفاده از توری فیبری کوتاه [۷ -۸] یا توری فیبری چرپ شده خطی [۹] اشاره کرد.

در این مقاله مدل ریاضی واکوکی در لیزر قفل مد فعال تشریح شده و سپس تاثیر فرکانس واکوکی و پهنای باند فیلتر نوری موجود در مسیر در خروجی پالس لیزر ارائه و نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- اثر واکوکی در قفل مد فعال لیزر فیبری

تابع انتقال فیلتر $T(w)$ و تابع انتقال مدولاتور ماخ-زندر $M(t)$ به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$T(\omega)=\exp\left(-\beta\omega^2\right) \quad (۱)$$

$$M(t)=\cos\left[\frac{\pi}{2}(1-b)-\frac{\pi}{4}m\cos\left(\omega_m t\right)\right] \quad (۲)$$

که در آن $\beta=2\ln\left(2/\Delta\omega^2\right)$، $\Delta\omega$ پهنای باند فیلتر است. b نقطه بایاس مدولاتور است و $b=0.5$ برای نقطه بایاس یک چهارم است و m ضریب مدولاسیون است. و ω_0 فرکانس مدولاسیون است. با بسط تابع مدولاتور (۲) در نزدیک قله تابع انتقال در زمان $t=0$ به‌صورت سری تیلور این تابع به‌صورت زیر خواهد شد [۱۰]:

$$M(t)=\Gamma\exp\left(-\delta_m t^2\right) \quad (۳)$$

که در آن $\delta_m=m\omega_m^2/4$ و Γ، تلفات کل مدولاتور در کاواک شامل، تلفات الحاقی، تلفات بایاس مدولاتور و جفت شدگی قطعات است.

شکل پالس ورودی بعد از n بار گردش به‌صورت زیر تبدیل شود:

$$A_n(t)=A\exp\left(-\alpha\left(t-t_s\right)^2\right) \quad (۴)$$

که در آن A، دامنه پالس، α، پارامتر پالس گوسی، t_s، موقعیت پالس با مرجع قله انتقال مدولاتور است. سیگنال پس از فیلتر نوری در بازه زمانی به صورت زیر خواهد بود:

$$A_{nI}(t)=F^{-1}\left\{G_0T(\omega)F\left[A_n(t)\right]\right\} \quad (۵)$$

که در آن F و F^{-1} به‌ترتیب تبدیل فوریه و تبدیل فوریه معکوس است که با جایگذاری (۱)، در (۴) و (۵) خواهیم داشت:

$$A_{nI}(t)=\frac{G_0A}{\sqrt{1+4\alpha\beta}}\exp\left[\frac{-\left(t-t_s\right)^2}{\left(1+4\alpha\beta\right)}\right] \quad (۶)$$

اگر فرکانس مدولاسیون با Δf_m ، هامونیک N ام فرکانس قفل مد f_{m0} : $\Delta f_m=f_m-f_{m0}$ واکوک شود. پالس به مدولاتور با تاخیر زمانی به‌صورت زیر خواهد رسید:

$$t_d=N\left(\frac{1}{f_{m0}}-\frac{1}{f_m}\right)\approx\frac{N\,\Delta f_m}{f_{m0}^2} \quad (۷)$$

پس از عبور از مدولاتور پالس یک چرخه را کامل کرده و به شکل زیر در می‌آید:

$$A_{n+1}(t)=A_{nI}(t)M(t)=\frac{G_0A\Gamma}{\sqrt{1+4\alpha\beta}} \times exp\left\{-\left[\frac{4\alpha}{\left(1+4\alpha\beta\right)}+\delta_m\right]\left(t-t_s-t_d\right)^2\right\} \quad (۸)$$

با شرط خود سازگاری در حالت پایدار $A_{n+1}(t)=A_n(t)$، و توازن ترم‌ها در دو طرف خواهیم داشت [۱۰]:

$$\alpha=\frac{1}{2}\sqrt{\delta_m^2+\frac{\delta_m}{\beta}}+\frac{\delta_m}{2} \quad (۹)$$

$$t_s=\frac{t_d}{4\alpha\beta} \quad (۱۰)$$

$$G_0=\frac{\sqrt{1+4\alpha\beta}}{\Gamma}\exp\left(\frac{t_d^2}{4\beta}\right) \quad (۱۱)$$

در رابطه (۹)، پارامتر گوسی پالس α، وابسته به فرکانس مدولاتور خواهد بود. در عبارت (۱۰)، موقعیت پالس مرجع با تاخیر زمانی پالس متناسب بوده و بهره با نسبت $\exp\left(t_d^2/4\beta\right)$ افزایش می‌یابد. هنگامی که واکوکی دقیق رخ می‌دهد، $t_d=0$ و $\Delta f_m=0$ خواهیم داشت:

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

$$\alpha = \frac{1}{2}\sqrt{\delta_m^2 + \frac{\delta_m}{\beta}} + \frac{\delta_m}{2} \quad (۱۲)$$

$$t_s = 0 \quad (۱۳)$$

$$G_0 = \frac{\sqrt{1+4\alpha\beta}}{\Gamma} \quad (۱۴)$$

در این معادلات از نویز تقویت کننده صرف‌نظر شده است. با قرار دادن پارامترهای لیزر قفل مد، مانند مشخصات محیط فعال فیبری، فیلتر میان گذر و مدولاتور در معادلات واکوکی لیزر می‌توان تاثیر واکوکی در خروجی لیزر قفل مد را محاسبه کرد.

۳- نتایج شبیه سازی عددی

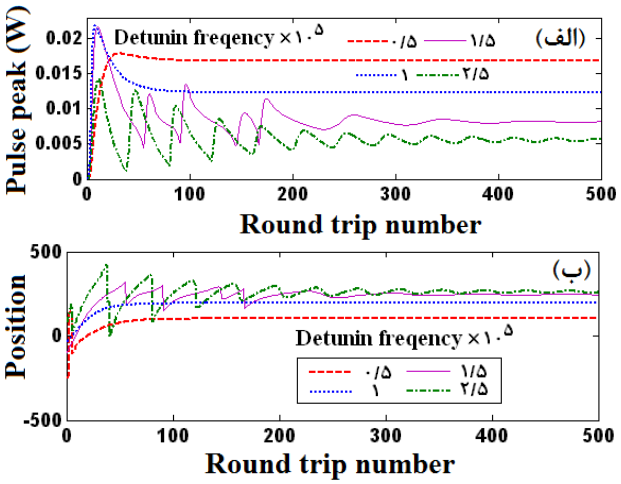
مشخصات ادوات مختلف لیزر قفل مد در این شبیه سازی در جدول (۱) آمده است. در این مقاله طول موج پرتو عبوری ۱۵۵۰ nm، G_0 =۲۰dB، توان اشباع، ۱۰dBm، ضریب مدولاسیون m=۰/۵، α =۱۰ dB، درجه هارمونیک، N=۱۰۰۰ و از نویز در محیط فعال در مسیر نوری صرف‌نظر شده است. بیشینه تعداد دور گردش پرتو در کاواک ۵۰۰ بار در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات لیزر قفل مد برای شبیه سازی

پارامتر	علامت	مقدار
طول موج مرکزی	λ_0	۱۵۵۰ nm
مشخصات محیط بهره		
ضریب بهره	G_0	۲۰ dB
توان اشباع	P_{sat}	۱۰ dBm
تعداد نمونه در پهنای پالس برای محاسبات		۱۰۲۴
مشخصات مدولاتور		
نقطه بایاس مدولاتور	b	۰/۵
ضریب مدولاسیون	m	۰/۵
فرکانس مدولاسیون	f_m	۱۰ GHz
هامونیک n ام	N	۱۰۰۰
تلفات	α	۱۰ dB
مشخصات فیلتر نوری		
پهنای باند فیلتر	λ_{3dB-F}	۱ nm

محاسبات از یک پالس نویز اولیه شروع می‌شود، به عبارت دیگر پالس اولیه شکل خاصی ندارد و از یک تابع تصادفی به‌عنوان پالس اولیه استفاده شده است. و پس از عبور از محیط فعال و مدولاتور و فیلتر نوری به آشکارساز می‌رسد. در شکل (۱) تغییرات توان قله پالس و موقعیت پالس تا ۵۰۰ بار چرخش در حلقه کاواک برای مقادیر مختلف فرکانس واکوکی نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل (۱) مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس واکوکی از مقدار ۰/۰۵ به ۰/۲۵ مگاهرتز، بیشینه قله توان کاهش می‌یابد. در فرکانس واکوکی ۰/۲۵ مگاهرتز نوساناتی نیز در قله پالس خروجی لیزر مشاهده می‌شود. این نوسانات حتی پس از ۵۰۰ بار چرخش پالس در کاواک قابل مشاهده است و اثری نامطلوب در خروجی لیزر محسوب می‌شود. بنابراین برای هر لیزر قفل مد با مشخصات معین محیط فعال و مدولاتور، بیشینه فرکانس واکوکی برای افزایش نرخ تکرار پالس می‌تواند اعمال شود. که بر اساس پارامترهای تعیین شده در این مقاله، فرکانس واکوکی باید کمتر از ۰/۲۰ مگاهرتز باشد تا کیفیت خروجی لیزر مطلوب باشد. همچنین برای فرکانس‌های واکوکی کمتر از ۰/۲۵ مگاهرتز، موقعیت و همچنین قله پالس، پس از ۵۰ دور چرخش در کاواک ثابت می‌شود. دلیل مشاهده یک افزایش ناگهانی در منحنی قله پالس در نقطه شروع محاسبات، استفاده از پالس تصادفی در شبیه سازی است. اگر پالس ورودی گوسی فرض شود افزایش منظمی برای قله پالس در کاواک از صفر تا بیشینه قابل ملاحظه است. به عنوان مثال پیک مشاهده شده در فرکانس واکوکی ۰/۱ مگا هرتز، در هر بار اجرای برنامه تغییر می‌کند و یا ممکن است اصلاً مشاهده نشود. بنابراین اطلاعات خروجی کمتر از ۲۰ دور چرخش مورد توجه نیست و چون پالس اولیه یک پالس تصادفی است، می‌تواند تغییر کند.



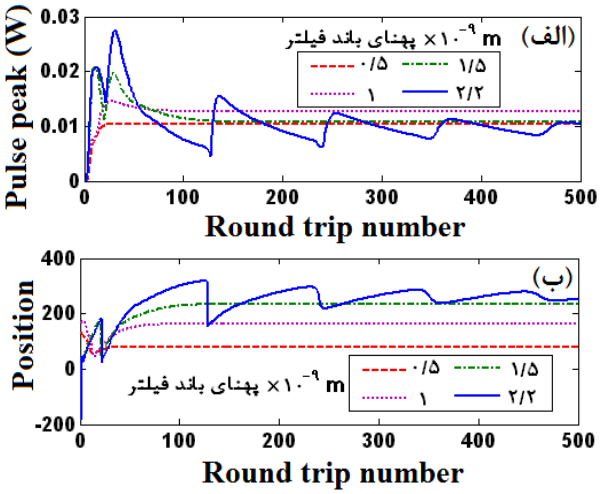
شکل۱: تغییرات الف-توان قله پالس ب- موقعیت پالس در لیزر قفل مد با فرکانس واکوکی مختلف بر حسب تعداد چرخش در کاواک.

در شکل (۲) تاثیر پهنای باند فیلتر در توان قله خروجی و همچنین موقعیت پالس بر حسب تعداد چرخش پالس در لیزر قفل مد با فرکانس واکوکی ۰/۱ مگا هرتز، بررسی شده

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

است.



شکل۲: تغییرات الف-توان قله پالس ب- موقعیت پالس در لیزر قفل مد برای پهنای باند مختلف فیلتر بر حسب تعداد چرخش در کاواک.

همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود، قله توان خروجی لیزر با افزایش پهنای باند فیلتر از ۰/۵به ۱ نانومتر افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر پهنای باند فیلتر تا ۱/۵ نانومتر، بیشینه توان قله لیزر کمتر می‌شود ولی هنوز خروجی لیزر دچار اعوجاج نشده است. افزایش بیشتر پهنای باند فیلتر باعث می‌شود نه تنها خروجی قله پالس کمتر شود بلکه نوساناتی نیز در خروجی لیزر مشاهده شود که اثری نامطلوب است. با توجه به مشخصات لیزر قفل مد که در جدول (۱) ارائه شده است، بهینه پهنای باند فیلتر برای این لیزر ۱ نانومتر است. که علاوه بر ثابت بودن توان قله و کیفیت مطلوب پالس، توان قله نیز بیشینه می‌شود. در این نمودار نیز اگر پالس اولیه یک پالس تصادفی نبوده و شکل معینی داشته باشد تغییراتی که در ابتدای نمودار محاسباتی مشاهد می‌شود، حذف خواهد شد و روند تغییرات قله پالس بر حسب تعداد دور چرخش در کاواک منظم و صعودی خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

طبق معادلات واکوکی در لیزر قفل مد، پهنای پالس وابسته به واکوکی نیست و برای یک کوک دقیق یکسان است. واکوکی پهنای پالس حالت پایدار را تغییری نمی دهد اما موقعیت قله پالس را جابجا می‌کند. تغییر موقعیت قله پالس منتقل شده به‌صورت خطی متناسب با واکوکی است. به دلیل وجود تلفات، موقعیت پالس تغییر کرده و بهره کاواک با عامل $\exp\left(t_d^2/4\beta\right)$ متحول می‌شود. افزایش فرکانس واکوکی باعث کاهش قله توان و نوسان در خروجی لیزر می‌شود. با توجه به مشخصات لیزر قفل مد در این مقاله بهینه فرکانس واکوکی ۰/۰۵ مگاهرتز است. افزایش پهنای باند فیلتر در خروجی لیزر قفل مد با واکوکی مشخص، بررسی و نشان داده شده افزایش پهنای باند فیلتر از یک حد معین، باعث افت قله توان پالس و کیفیت نامطلوب در خروجی لیزر می‌شود. برای مشخصات لیزر قفل مد مندرج در مقاله، بهینه پهنای باند فیلتر ۱ نانومتر است. بر اساس نتایج این مقاله برای دست یابی به بیشینه توان با کیفیتی مطلوب، فیلتر میان گذر مورد استفاده در کاواک باید به دقت انتخاب شود. همچنین فرکانس واکوکی اعمال شده بر مدولاتور نمی‌تواند از حد مشخصی افزایش یابد که مقدار آن به مشخصات ادوات لیزری مورد استفاده در کاواک وابسته است.

مراجع

[1] H. Chen, S. P. Chen, L. Si, B. Zhang, and Z. F. Jiang, "Different pulse pattern generation by frequency detuning in pulse modulated actively mode-locked ytterbium doped fiber laser", Proc. of SPIE, Technologies for Optical Countermeasures XII; and High-Power Lasers, Vol. 9650, P. 96500O-1, 2015.

[2] A. E. Siegman, "*Lasers*", University Science Book, Printed in the United State of America, 1986.

[3] W. J. Lai, P. Shum, and L.N. Binh, "Stability and transient analyses of temporal Talbot-effect-based repetition-rate multiplication mode-locked laser systems", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 16, pp. 437–439, 2004.

[4] J. M. Sousa and O.G. Okhotnikov, "Multiple wavelength Q-switched fiber laser", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 11, pp. 1117–1119, 1999.

[5] G. R. Lin, Y.C. Chang, and J.R. Wu, "Rational harmonic mode-locking of erbiumdoped fiber laser at 40 GHz using a loss-modulated Fabry-Perot laser diode", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 16, pp. 1810–1812, 2004.

[6] K. S. Abedin, N. Onodera, and M. Hyodo, "Repetition-rate multiplication in actively mode-locked fiber lasers by higher-order FM mode-locking using a high finesse Fabry Perot filter", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, pp. 1311–1313, 1998.

[7] J. Azana, R. Slavik, P. Kockaert, L.R. Chen, and S. LaRochelle,"Generation of customized ultrahigh repetition rate pulse sequences using superimposed fiber Bragg gratings", J. Lightwave Technol.,Vol. 21, pp. 1490–1498, 2003.

[8] M. Marano, S. Longhi, and P. Laporta, M. Belmonte and B. Agogliati, "All-optical square-pulse generation and multiplication at 1.5 mm by use of a novel class of fiber Bragg gratings", Opt. Lett., Vol. 26, pp. 1615-1617, 2001.

[9] J. Azana, M. A. Muriel, "Temporal self-imaging effects: Theory and application for multiplying pulse repetition rates," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 37, pp. 728–744, 2001.

[10] H. Q. Lamac, P. Shuma, L. N. Binhb, Y. D. Gongc, S. Fua, "Mathematical Series for Analysis of Detuned Active Mode Locked", Co. on Passive Components and Fiber-based Devices IV, Proc. of SPIE Vol. 6781, P. 67813D-1, 2007.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]