



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۱۳۹۷ بهمن ۹-۱۱



تأثیر پارامترهای دمش بر عملکرد یک لیزر کلیدزنی Q شده و قفل شده مد Nd:GdVO₄

سید حسام رجائی، غلامرضا هنرآسا و علیرضا کشاورز

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

H.Rajae@sutech.ac.ir

چکیده - در این مقاله با استفاده از معادلات نرخ جفت شده، رفتار یک لیزر Nd:GdVO₄ کلید زنی Q و قفل شده مد با جاذب اشباع پذیر Cr⁴⁺:YAG شبیه سازی شده است. به این منظور معادلات نرخ از رهیافت افت وخیز حل و توان متوسط و انرژی تپ خروجی محاسبه شده است. همچنین تأثیر توان دمش و پهنای میانگین پرتو دمش بر عملکرد لیزر بررسی شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش توان دمش و پهنای میانگین پرتو دمش، انرژی تپ خروجی افزایش می یابد.
کلید واژه- لیزر Nd:GdVO₄، جاذب اشباع پذیر Cr⁴⁺:YAG، قفل شدگی مد، کلیدزنی Q.

The Effect of Pump parameters on the performance of a Nd:GdVO₄ Q-Switched and Mode-Locked Laser

Seyed Hessam Rajaei, Gholamreza Honarasa and Alireza Keshavarz

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz

Abstract-In this paper, the behavior of a Q-switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber is simulated by using the coupled rate equations. For this purpose, the rate equations are solved by fluctuation mechanism and the average output power and pulse energy are calculated. Also, the impact of the incident pump power and average radius of the pump beam on the performance of the laser is investigated. The results show that as the incident pump power and average radius of the pump beam are increased, the pulse energy is increased.

Keywords: Nd:GdVO₄ Laser, Cr⁴⁺:YAG Saturable absorber, Mode locking, Q-switching

مقدمه

استفاده همزمان از کلیدزنی Q و قفل شدگی مد می‌تواند تپ‌های لیزر با توان قله‌ای بالا و پهنای تپ فوق کوتاه (پیکو ثانیه‌ای) که برای کاربردهای زیادی مورد نیاز است را فراهم کند و باعث می‌شود یکی از موضوعات مورد توجه در زمینه لیزر باشد. کلیدزنی Q و قفل شدگی مد هم زمان یک راه ساده را برای افزایش توان قله در مقایسه با روش قفل شدگی مد موج پیوسته فراهم می‌کند [۱]. با استفاده از این روش می‌توان برای لیزرهای حالت جامد پر کاربرد ناخالصی سازی شده با یون نئودیم و لیزرهای حالت جامد فرکانس دو برابر شده درون کاواک با مدت زمان تپ فوق سریع و توان قله بالا استفاده کرد. از جمله کاربردهای این لیزرها می‌توان به پردازش مواد، میکرو ماشین، سنجش از راه دور، چشم پزشکی، ذخیره‌سازی اطلاعات، ارتباطات همدوس تشخیص‌های پزشکی، هولوگرافی و صنعت اشاره کرد [۲].

بلور Nd:GdVO_4 یک ایزوتوپ Nd:YVO_4 است و به عنوان ماده فعال در لیزرهای دمش دیودی استفاده می‌شود. بلور Nd:GdVO_4 دارای پهنای باند بالا و هدایت گرمایی بالا است و مناسب تر از بلور Nd:YVO_4 برای عملکرد در حالت قفل شدگی مد است [۱].

بلور $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$ به علت خصوصیات گرمایی و مکانیکی مناسب، به طور گسترده به عنوان جاذب اشباع پذیر برای تولید تپ‌های کلید زنی Q و قفل شده مد استفاده می‌شود. زمانی که شدت درون کاواک لیزر کم باشد بیشتر یون‌های Cr^{+4} در $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$ در تراز پایه قرار دارند و جذب تراز برانگیخته ناچیز است. در این حالت $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$ می‌تواند لیزرهای ناخالصی سازی شده با Nd^{+3} را کلید زنی Q کند اما در این حالت از قفل شدگی مد جلوگیری می‌شود. اما اگر شدت درون کاواک به اندازه کافی باشد، تمام یون‌های Cr^{+4} به سرعت به اولین تراز برانگیخته می‌روند و برانگیختگی بیشتر به وسیله‌ی جذب

تراز برانگیخته قوی باعث تجمع یون‌های Cr^{+4} در ترازهای مجازی بالاتر می‌شود. از آنجا که زمان استراحت ترازهای بالای مجازی تا اولین تراز برانگیخته زیر نانو ثانیه است، این امکان وجود دارد که تپ‌های کلید زنی Q و قفل شده مد همزمان دریافت شود به شرطی که شدت درون کاواک لیزر به اندازه کافی برای اشباع جذب تراز برانگیخته بزرگ باشد. بنابراین جذب تراز برانگیخته اشباع شده‌ی قوی بلور $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$ به عنوان مکانیزم فیزیکی تولید تپ‌های قفل شده مد در نظر گرفته شده است [۳].

مبانی نظری

از رهیافت افت و خیز برای توصیف تپ‌های پیکوثانیه‌ای در لیزر کلید زنی Q و قفل شده مد همزمان با یک جاذب اشباع پذیر استفاده می‌شود. بر اساس این رهیافت، دو مرحله برای تشکیل تپ فوق کوتاه وجود دارد: مرحله خطی و مرحله غیر خطی. در حالی که مرحله غیر خطی شامل جذب غیر خطی و تقویت غیر خطی می‌شود. در مرحله‌ی خطی، نوسانات شدت به علت تداخل تعداد زیادی از مد‌ها که دارای توزیع فاز تصادفی هستند به وجود می‌آید. بنابراین تابش متشکل از یک مجموعه بی نظم از قله‌های فوق کوتاه است. در مرحله غیرخطی، قله‌های نوسان قوی‌تر، سریعتر از قله‌های ضعیف‌تر، فشرده و تقویت می‌شوند [۴].

با استفاده از رهیافت افت و خیز و در نظر گرفتن توزیع فضایی گاوسی فوتون‌های درون کاواک، شکل شدت میانگین فوتون‌ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱]:

$$\phi(r,t) = \sum_{k=0} \phi_k f(t-t_k) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_l^2}\right) \quad (1)$$

که در آن r مختصات شعاعی، ϕ_k شدت در k امین رفت و برگشت، t_k زمان رفت و برگشت کاواک، ω_l شعاع عرضی میانگین مد TEM_{00} در کاواک و $f(t)$ تپ‌های قفل شده

که در آن ϕ چگالی فوتون درون کاواک، r مختصات شعاعی، ω_1 شعاع میانگین مد (TEM_{00}) در کاواک، σ سطح مقطع گسیل القایی ماده فعال، σ_g سطح مقطع جذب تراز پایه جاذب اشباع پذیر، σ_e سطح مقطع جذب تراز برانگیخته جاذب اشباع پذیر، t_r زمان رفت و برگشت کاواک، l_s طول جاذب اشباع پذیر، l طول مادهی فعال، $n(r, t)$ چگالی جمعیت وارون میانگین، $n_{s1}(r, t)$ چگالی جمعیت وارون تراز پایه جاذب اشباع پذیر، c سرعت نور، n_{s0} چگالی جمعیت کل جاذب اشباع پذیر، L ضریب اتلاف، R ضریب بازتاب آینهی خروجی لیزر، R_{in} نرخ پمپ، τ طول عمر نشر القایی ماده فعال، τ_s طول عمر تراز برانگیخته جاذب اشباع پذیر، $\phi_g(r, t)$ چگالی فوتون در ماده فعال، $\phi_s(r, t)$ چگالی فوتون در جاذب اشباع پذیر است.

شبیه سازی

برای شبیه سازی لیزر، معادلات نرخ لیزر کلیدزنی Q و قفل شده مد همزمان به وسیلهی جاذب اشباع پذیر را با استفاده از جایگذاری رابطه (۱) در آنها و انتگرال گیری مستقیم حل می کنیم و ϕ_k را به دست می آوریم و توان خروجی متوسط از رابطهی زیر به دست می آید [۱]:

$$P(t) = \frac{h\nu A}{4\sigma p} \sum_{k=0}^{\infty} \phi_k \operatorname{sech}^2\left(\frac{t-t_k}{\tau p}\right) \quad (7)$$

که در آن A سطح مقطع مد، h ثابت پلانک و ν فرکانس لیزر است. همچنین انرژی تپهای قفل شده مد و کلید زنی Q شده از رابطهی زیر به دست می آید:

$$E = \frac{h\nu A}{4\sigma} \sum_{k=0}^{\infty} \phi_k \quad (8)$$

به منظور انجام شبیه سازی از مقادیر جدول ۱ استفاده شده است. در شکل ۱ توان خروجی متوسط بر حسب زمان رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود قطار تپ های قفل شده مد در زیر پوش تپ کلیدزنی Q شده

مد تکامل یافته از نویز است که برای بازسازی تپهای قفل شده مد در زیر پوشش کلید زنی Q شده به کار گرفته شده است. تابع $f(t)$ معمولاً به صورت زیر تعریف می شود [۱]:

$$f(t) = \frac{1}{2\sigma\tau_p} \operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{\tau_p}\right) \quad (2)$$

که در آن c سرعت نور، σ سطح مقطع گسیل القایی ماده فعال، τ_p وابسته به FWHM مدت زمان تپ قفل شده مد $\tau = 1.76\tau_p$ است. τ در طول موج پایه است $\tau = 1.76\tau_p$ است. بنابراین شکل گاوسی شدت میانگین فوتون ها در رفت و برگشت k ام به صورت زیر خواهد بود [۱]:

$$\phi_k(r, t) = \phi_k f(t) \exp\left(-\frac{2r^2}{w_l^2}\right) \quad (3)$$

معادلات نرخ

معادلات نرخ لیزر، کلیدزنی Q و قفل شده مد همزمان با در نظر گرفتن توزیع فضایی گاوسی شدت فوتون درون کاواک، به صورت زیر است [۵]:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} = \frac{2}{\pi\omega_l^2} \int_0^{\infty} \frac{1}{t_r} \{ & 2\sigma n(r, t) l \phi_g(r, t) \\ & - 2\sigma_g n_{s1}(r, t) l_s \phi_s(r, t) \\ & - 2\sigma_e [n_{s0} - n_{s1}(r, t)] l_s \phi_s(r, t) \\ & - [L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)] \phi(r, t) \} 2\pi dr \end{aligned} \quad (4)$$

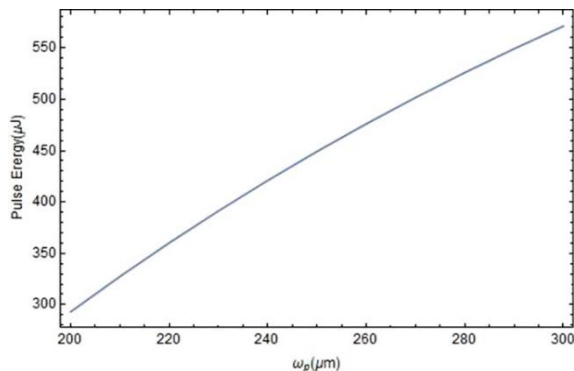
$$\begin{aligned} \frac{dn(r, t)}{dt} = R_{in}(r) - \sigma cn(r, t) \phi_g(r, t) \\ - \frac{n(r, t)}{\tau} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{s1}(r, t)}{dt} = \frac{n_{s0} - n_{s1}(r, t)}{\tau_s} \\ - \sigma_g cn_{s1}(r, t) \phi_s(r, t) \end{aligned} \quad (6)$$

انرژی تپ خروجی برای مقادیر مختلف شعاع میانگین پرتو پمپ در شکل ۳ رسم شده است. در اینجا نیز با افزایش شعاع پرتو پمپ، انرژی تپ خروجی افزایش می یابد.

نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد یک لیزر کلیدزنی Q و قفل شده مد Nd:GdVO₄ با استفاده از حل معادلات نرخ بررسی شده است. این بررسی نشان می دهد که با استفاده از جاذب پذیر مناسب می توان به تپ های قفل شده مد با پوش تپ کلید زنی Q شده دست یافت. همچنین با افزایش توان دمش و پهنای میانگین پرتو پمپ، انرژی تپ خروجی افزایش می یابد.



شکل ۳: تغییرات انرژی تپ خروجی بر حسب شعاع میانگین پرتو پمپ.

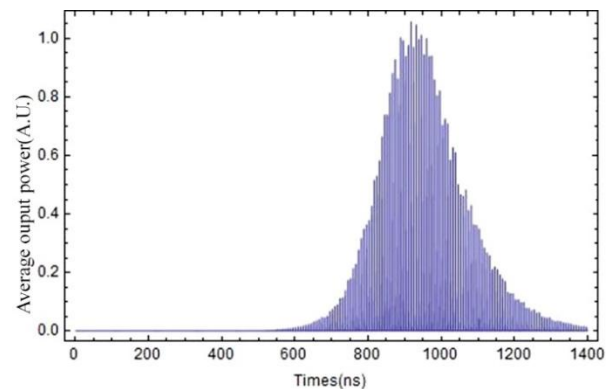
مرجع ها

- [1] Li M., Zhao S., Yang K., Li G., Li D., Wang J. and An J., "Diode-Pumped Passively Q-Switched Mode-Locked c-Cut Nd:GdVO₄ Laser with Cr:YAG Saturable Absorber", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 10A, pp.7713-7718, 2006.
- [2] Zhao S. and Li G., "Numerical simulation of dual-loss-modulated Q-switched and mode-locked laser with an acousto-optic and Cr⁴⁺:YAG Saturable Absorber", Appl. Opt., Vol. 49, pp. 1802-1808, 2010
- [3] Chen Y.F., Tsai S.W., "Simultaneous Q-Switching and Mode-Locking in a Diode-Pumped Nd:YVO₄-Cr⁴⁺:YAG Laser", IEEE. J. Qut. Elc, Vol. 37, No. 4, pp. 580-586, 2001
- [4] Kryukov P.G., Letokhov V.S., "Fluctuation Mechanism of Ultrashort Plus Generation by Laser With Saturable Absorber", IEEE. J. Quantum Electron, Vol. Qe-8, No. 10, pp. 766-782, 1972
- [5] Li G., Zhao S., Zhao H., Yang K., Ding S., "Rate Equation And Solution of a Laser-Diode-end-pumped passively Q-switched intracavity doubling laser by taking into account spatial distribution", Opt. Comm. Vol. 347, pp. 321-328, 2004

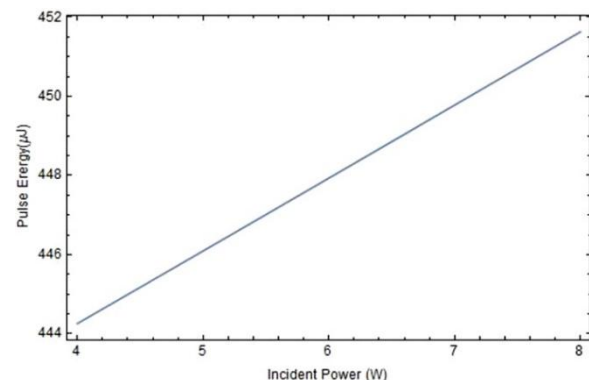
مشاهده می شود. در شکل ۲ انرژی تپ برای مقادیر مختلف توان پمپ ورودی رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش توان پمپ انرژی پالس خروجی نیز افزایش می یابد.

جدول ۱: مقادیر استفاده شده در شبیه سازی [۱]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
σ	$1.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	τ_s	$3.2 \mu\text{s}$
σ_g	$4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	ω_1	$220 \mu\text{m}$
σ_e	$8.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	L	0.08
τ	$90 \mu\text{s}$	R	0.94



شکل ۱: شدت تپ کلید زنی Q شده بر حسب زمان.



شکل ۲: تغییرات انرژی تپ خروجی بر حسب توان پمپ ورودی.