



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



## تأثیر پارامترهای دمش بر عملکرد یک لیزر کلیدزنی Q شده و قفل شده مد Nd:GdVO<sub>4</sub>

سید حسام رجائی، غلامرضا هنرآسا و علیرضا کشاورز

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

[H.Rajae@sutech.ac.ir](mailto:H.Rajae@sutech.ac.ir)

چکیده - در این مقاله با استفاده از معادلات نرخ جفت شده، رفتار یک لیزر Nd:GdVO<sub>4</sub> کلیدزنی Q و قفل شده مد با جاذب اشباع پذیر Cr<sup>4+</sup>: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:GdVO<sub>4</sub>، جاذب اشباع پذیر Cr<sup>4+</sup>:YAG، قفل شدگی مد، کلیدزنی Q.

## The Effect of Pump parameters on the performance of a Nd:GdVO<sub>4</sub> Q-Switched and Mode-Locked Laser

Seyed Hessam Rajae, 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:GdVO<sub>4</sub> laser with Cr<sup>4+</sup>: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:GdVO<sub>4</sub> Laser, Cr<sup>4+</sup>:YAG Saturable absorber, Mode locking, Q-switching

## مقدمه

تراز برانگیخته قوی باعث تجمع یون های  $\text{Cr}^{+4}$  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 شده ی 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 پیکوثانیه ای 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 مرحله ی 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 قله های فوق کوتاه است. در مرحله غیرخطی، قله های نوسان قوی‌تر، سریعتر از قله های 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 فوتون ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱]:

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

که در آن  $r$  مختصات شعاعی،  $\phi_k$  شدت در  $k$  امین رفت و برگشت،  $t_k$  زمان رفت و برگشت کاواک،  $\omega_k$  شعاع عرضی میانگین مد  $\text{TEM}_{00}$  در کاواک و  $f(t)$  تپ های قفل شده

استفاده همزمان از کلیدزنی  $Q$  و قفل شدگی مد می‌تواند تپ های لیزر با توان قله‌ی 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 نئودیوم و لیزر های 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 تشخیص های پزشکی، هولوگرافی و صنعت اشاره کرد [۲].

بلور  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  یک ایزوتوپ  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  است و به عنوان ماده فعال در لیزر های دمش دیودی استفاده می‌شود. بلور  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  دارای پهنای باند بالا و هدایت گرمایی بالا است و مناسب تر از بلور  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  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 تپ های کلید زنی  $Q$  و قفل شده مد استفاده می‌شود. زمانی که شدت درون کاواک لیزر کم باشد بیشتر یون‌های  $\text{Cr}^{+4}$  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 لیزر های ناخالصی سازی شده با  $\text{Nd}^{+3}$  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  $\text{Cr}^{+4}$  به سرعت به اولین تراز برانگیخته می‌روند و برانگیختگی بیشتر به وسیله‌ی جذب

که در آن  $\phi$  چگالی فوتون درون کاواک،  $r$  مختصات شعاعی،  $\omega_1$  شعاع میانگین مد (TEM<sub>00</sub>) در کاواک،  $\sigma$  سطح مقطع گسیل القایی ماده فعال،  $\sigma_g$  سطح مقطع جذب تراز پایه جاذب اشباع پذیر،  $\sigma_e$  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،  $\tau$  طول عمر نشر القایی ماده فعال،  $\tau_s$  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  $\phi_k$  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  $\nu$  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]:

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

که در آن  $c$  سرعت نور،  $\sigma$  سطح مقطع گسیل القایی ماده فعال،  $\tau_p$  وابسته به FWHM مدت زمان تپ قفل شده مد  $\tau = 1.76\tau_p$  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]:

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

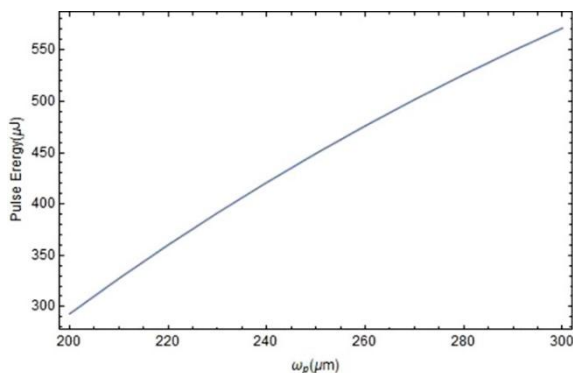
$$\begin{aligned} \frac{dn(r, t)}{dt} = R_{in}(r) - \sigma cn(r, t) \phi_g(r, t) \\ - \frac{n(r, t)}{\tau} \end{aligned} \quad (5)$$

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

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:GdVO<sub>4</sub> 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.

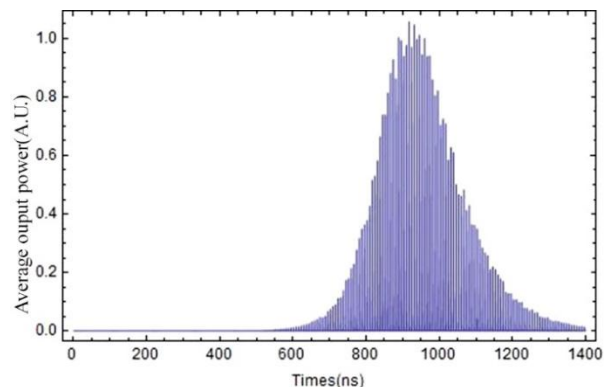
### مرجع ها

- [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:GdVO<sub>4</sub> 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 Cr<sup>3+</sup>: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:YVO<sub>4</sub>-Cr<sup>4+</sup>: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

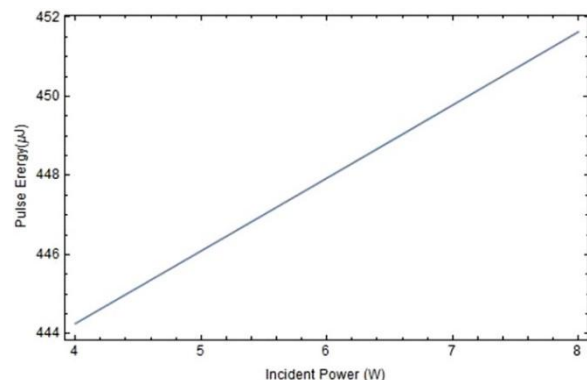
مشاهده می شود. در شکل ۲ انرژی تپ برای مقادیر مختلف توان پمپ ورودی رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش توان پمپ انرژی پالس خروجی نیز افزایش می یابد.

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

پارام تر	مقدار	پارام تر	مقدار
$\sigma$	$1.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	$\tau_s$	$3.2 \mu\text{s}$
$\sigma_g$	$4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	$\omega_1$	$220 \mu\text{m}$
$\sigma_e$	$8.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	$L$	0.08
$\tau$	$90 \mu\text{s}$	$R$	0.94



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



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