



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. ۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸



## بررسی پارامترهای تقویت در سیستم نوسانگر-تقویت کننده فیبری سوئیچ Q

نرگس شفیعی موسوی<sup>۱</sup>، پرویز پروین<sup>۲</sup> و مریم ایلچی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [nshafii@aut.ac.ir](mailto:nshafii@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [parvin@aut.ac.ir](mailto:parvin@aut.ac.ir)

<sup>۳</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی؛ [milchi@aeoi.org.ir](mailto:milchi@aeoi.org.ir)

چکیده - در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای سیستم نوسانگر-تقویت کننده فیبری سوئیچ Q دو غلافه آلیبده به ایتربیوم در بستر سیلیکا ارائه شده است. در ابتدا معادلات نرخ وابسته به زمان بر اساس روش تفاضل محدود به روش عددی حل می‌شوند و مشخصات پالس خروجی به دست می‌آید. این پالس به منظور تقویت بیشتر وارد تقویت کننده می‌شود و ضرایب بهره و اشباع با استفاده بهترین انطباق بین داده‌های حاصل از حل معادلات نرخ و معادله تقویت گذرا، بر اساس روش حداقل مجذور مربعات (LSM) به دست می‌آیند. در انتها، وابستگی پارامترهای مختلف کاواک روی ضرایب بهره و اشباع مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه- ضریب بهره، توان اشباع، سوئیچ Q، لیزر فیبری، نوسانگر-اصلی تقویت کننده-توان

## Investigation of Amplification Parameters in Q-switched Fiber Oscillator-Amplifier System

Narges Shafii Mousavi<sup>1</sup>, Parviz Parvin<sup>2</sup>, and Maryam Eilchi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Photonics Engineering Group, Department of Physics, Amirkabir University of Technology

<sup>2</sup>Photonics Engineering Group, Department of Physics, Amirkabir University of Technology

<sup>3</sup>Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI)

**Abstract-** In this paper, an analytical model is presented for master-oscillator power-amplifier (MOPA) of Q-switched double-clad ytterbium doped fiber system. First, the time-dependent rate equations are solved numerically by the finite difference method and the output pulse characteristics are obtained. For more amplifying, the pulse is injected to the amplifier and the gain and saturation coefficients are obtained by using the best fitting between the data obtained from the solving of the rate equations and the transient amplification equation, based on the least squares method (LSM). Finally, the dependence of different cavity parameters on small signal gain and saturation power are analyzed.

**Keywords:** Gain coefficient; Saturation power; Q-switched; Fiber laser; Master-oscillator power-amplifier.

$$N = N_1 + N_2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{N_2}{\tau} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1 - \sigma_e(\lambda_p) N_2] \times (P_p^+ + P_p^-) + \sum_k \frac{\Gamma_k \lambda_k}{hcA} [\sigma_a(\lambda_k) N_1 - \sigma_e(\lambda_k) N_2] (P_k^+ + P_k^-) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p}{\partial t} = -\Gamma_p [\sigma_e(\lambda_p) N_2 - \sigma_a(\lambda_p) N_1] P_p - \alpha_p P_p \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial z} + \frac{1}{v_k} \frac{\partial P_k}{\partial t} = -\Gamma_k [\sigma_e(\lambda_k) N_2 - \sigma_a(\lambda_k) N_1] P_k \quad (4)$$

$$-S \alpha_{RS} P_k^+ - \alpha_s P_k^+ + 2 \sigma_e(\lambda_k) N_2 \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \Delta \lambda_k, k=1, \dots, s$$

که  $N$  بیانگر غلظت کل ماده آلاینده است،  $N_1$  و  $N_2$  به ترتیب جمعیت تراز پایین و بالا لیزر هستند،  $P_k^\pm$  انتشار توان سیگنال در جهت مثبت و منفی محور  $Z$  در هسته فیبر است.  $P_p$  توان دمش،  $v_p$  و  $v_s$  سرعت گروه دمش و سیگنال در فیبر،  $C$  سرعت نور در خلاء،  $\tau$  طول عمر فلورسانس و  $A$  سطح ناحیه آلاینده فیبر است.  $\sigma_a(\lambda)$  و  $\sigma_e(\lambda)$  به ترتیب سطح مقطع‌های جذب و گسیل ایتربوم برای دمش و سیگنال است.  $\alpha_p$  ( $\alpha_s$ ) ضریب تضعیف فیبر دمش (سیگنال)،  $\Gamma_p$  ( $\Gamma_k$ ) فاکتور همپوشانی بین دمش و ناحیه آلاینده فیبر است.  $\alpha_{RS}$  ضریب پراکندگی رایلی،  $S$  ضریب جذب هسته فیبر و  $\sigma_a(\lambda)$  و  $\sigma_e(\lambda)$  به ترتیب سطح مقطع جذب و گسیل ایتربوم برای دمش و سیگنال است. شرایط مرزی مربوط به معادلات مشتق جزئی در حالت سوئیچ  $Q$  به این صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۵]:

$$P_p^+(0) = \eta_p P_{pl} \quad (5)$$

$$P_k^+(0, t) = P_k^-(0, t) [R_{HR}(\lambda_k) T_l^2(t) \eta_l \eta_{cpl}^2 + R_{res}] \quad (6)$$

$$P_k^-(L, t) = P_k^+(L, t) R_{OC}(\lambda_k) \eta_2^2, K = 1, \dots, s \quad (7)$$

که  $R_{HR}$  و  $R_{OC}$  به ترتیب ضریب انعکاس توری براگ  $HR$  و  $OC$ ،  $\eta_p$  ضریب تزویج دمش،  $\eta_{cpl}$  سیگنال عبوری تزویج‌گر دمش،  $\eta_1$  اتلاف سیگنال عبوری از تزویج‌گر اپتیکی،  $\eta_2$  مربوط به اتلاف اتصال بین فیبر و  $FBG$ ،  $R_{res}$  باقیمانده انعکاس سر فیبر،  $R_{oc} = 0.4$  و  $R_{HR} = 0.9999$  می‌باشند. به طور مشابه، قسمت تقویت کننده از معادلات

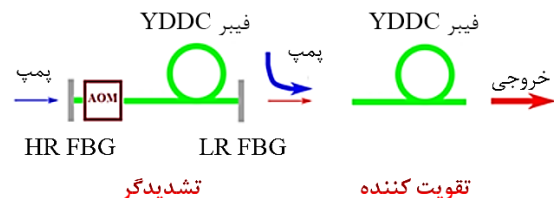
## مقدمه

در طراحی لیزرها و تقویت کننده‌های فیبری، ویژگی بهره و اشباع به عنوان پارامترهای اصلی در نظر گرفته می‌شوند [۱-۲]. در میان محیط‌های بهره مختلف، یون‌های نادر حاکی ایتربوم در لیزرهای فیبری توان بالا که در مد پالسی کار می‌کنند، بسیار کاربردی و مورد توجه هستند [۳-۴]. از این رو، مقالات متعددی به مدل‌سازی عددی و اندازه‌گیری تجربی پارامترهای بهره سیگنال کوچک و توان اشباع در لیزرهای فیبری سوئیچ  $Q$  پرداخته‌اند [۴].

در این مقاله مدل‌سازی یک سیستم نوسانگر-تقویت کننده فیبری سوئیچ  $Q$  دو غلافه آلاینده شده به ایتربوم در بستر سیلیکا ( $Yb:silica$ ) انجام شده است. سپس، اثر پارامترهای طول محیط بهره و توان ورودی بر روی بهره سیگنال کوچک و توان اشباع تقویت کننده بررسی شده است.

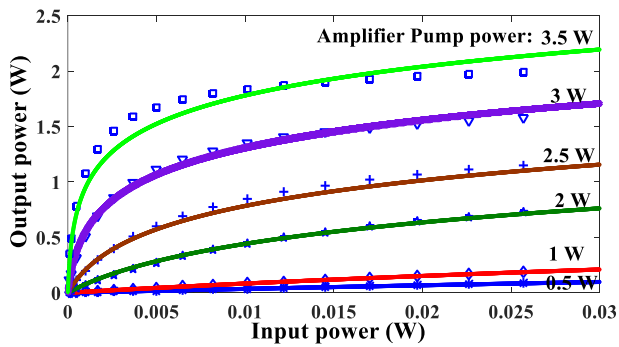
## تئوری

طرح لیزر فیبری دوغلافی سوئیچ  $Q$  توان بالا ایتربوم در شکل ۱ مشخص شده است. جهت انجام سوئیچ  $Q$  از المان آکوستو اپتیک ( $AOM$ ) استفاده شده است. این المان سبب عبور و عدم عبور پرتو موازی می‌گردد. توری فیبری براگ با ضریب بازتاب بالا ( $HR$ ) سبب انعکاس پرتو عبوری از  $AOM$  می‌گردد. توری براگ با طول موج مرکزی  $\lambda_s$  و انعکاس کمتر ( $LR$ ) در انتهای نوسانگر نقش جفت‌کنندگی خروجی را ایفا می‌کند. بنابراین، نوسان بین دو توری ایجاد می‌شود.



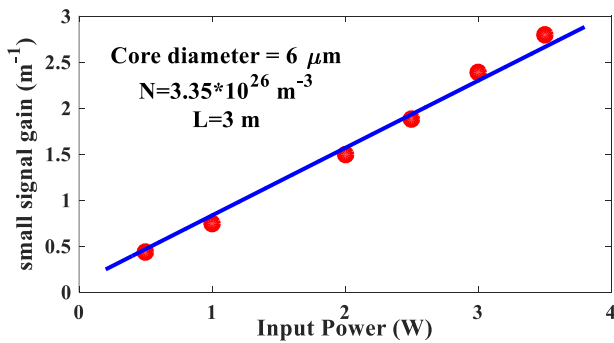
شکل ۱: طرح لیزر فیبری سوئیچ  $Q$ ؛ در شکل:  $AOM$ : المان آکوستو اپتیکی،  $FBG$ : تار نوری براگ معادلات نرخ در حالت ساده سازی شده به صورت روابط ۴-۱ بیان می‌شوند [۵]:

به منظور محاسبه بهره سیگنال کوچک ( $\gamma_0$ ) و توان اشباع ( $P_{sat}$ ) در تقویت کننده، پالس‌های حاصل از نوسانگر از یک فیلتر توان عبور می‌کنند. با تغییر فیلتر با ضرایب مختلف می‌توان نمودار تغییرات توان‌های ورودی به تقویت کننده به خروجی آن را رسم کرد. این فرآیند برای توان‌های دممش مختلف تقویت کننده در شکل ۳ رسم شده است. مجموعه نقاط نشان داده شده در شکل از حل معادلات نرخ حاصل شده است و خطوط منطبق به آن حاصل معادله تحلیلی (۹) است. با استفاده از روش LSM و انطباق حاصله می‌توان  $P_{sat}$  و  $\gamma_0$  را به دست آورد که برای مثال در توان دممش  $W$  به ترتیب برابر  $2.5 m^{-1}$  و  $0.36 W$  است.



شکل ۳: نمودار توان‌های ورودی به توان خروجی برحسب توان‌های مختلف دممش تقویت کننده

تغییرات  $\gamma_0$  و  $P_{sat}$  برحسب توان‌های ورودی به تقویت کننده به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در حالت توان پایین فیبر،  $\gamma_0$  به صورت خطی به توان دممش وابسته است. توان اشباع به علت ضریب همپوشانی ( $\Gamma_k$ )، به صورت خطی با توان دممش افزایش می‌یابد.



شکل ۴: تغییرات بهره سیگنال کوچک برحسب توان دممش ورودی

۴-۱ پیروی می‌کند، با این تفاوت که  $P_{S^-}(z) = 0$  و توری براگ در این قسمت وجود ندارد بنابراین، شرایط مرزی متفاوتی به صورت زیر دارد:

$$P_{S^+}^*(0, t) = P_{out}(0, t) \times \eta \quad (8)$$

که  $P_{out}$  بیانگر توان خروجی نوسانگر و  $\eta$  ضریب اتلاف جفت شدگی است. معادله تقویت گذرا (فرانتز-نادویک) نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$P_{out} = P_{sat} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{P_{in}}{P_{sat}} \right) - 1 \right] \exp(\gamma_0 L) \right\} \quad (9)$$

که در آن  $L$  طول فیبر است.

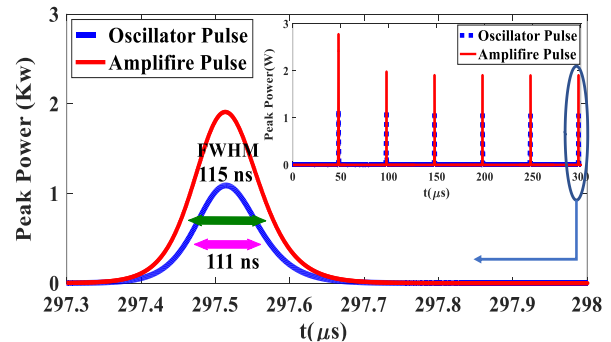
## بحث و نتایج

معادلات به کمک مقادیر عددی جدول ۱ و با استفاده از نرم افزار متلب و روش فاصله محدود حل شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای لیزر فیبری YDDC

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\lambda_s$	۱۰۸۰ nm	$\tau$	۱٫۳ ms
$\lambda_p$	۹۱۵ nm	$R_{HR}$	۹۹٫۹۹ %
$A$	$۴٫۹ \times ۱۰^{-۱۰} m^{-2}$	$R_{oc}$	۴ %
$L$	۳ m	$N_0$	$۳٫۳۵ \times ۱۰^{۲۶} m^{-3}$
$\alpha_p$	۰٫۰۸ dB/m	$\alpha_s$	۱ dB/m

طرحی از پالس‌های به دست آمده در نوسانگر-تقویت کننده در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن، پهنای زمانی پالس در نوسانگر ۱۱۱ ns و در تقویت کننده ۱۱۵ ns است.



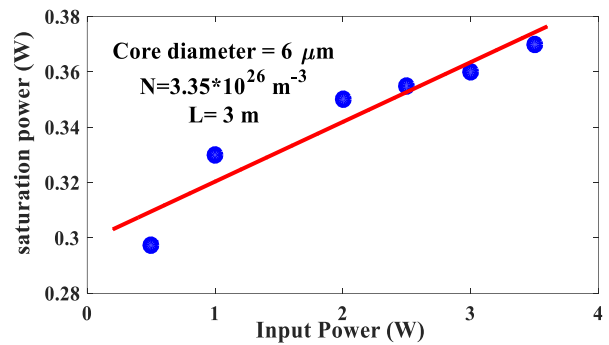
شکل ۲: شکل پالس خروجی نوسانگر-تقویت کننده

## نتیجه گیری

در این مقاله پارامترهای بهره سیگنال کوچک و توان اشباع در سیستم MOPA سوئیچ Q ایتربیوم-سیلیکا بررسی شده است و وابستگی پارامترهای طول کاواک و توان دمش بر ضرایب تقویت بررسی و تحلیل شده است. شبیه سازی عددی به کمک معادلات آهنگ تابع زمان انجام شده است و پس از تقویت سیگنال لیزری در تقویت کننده و انطباق با معادله تقویت گذرا، بهترین مقادیر  $\gamma_0$  و  $P_{sat}$  به دست آمده است. در لیزرهای فیبری، برخلاف سایر لیزرها، پارامترهای تقویت مقادیر ثابتی ندارند که از طبیعت دو غلافی بودن فیبر نوری و یکنواخت نبودن توان دمش در طول فیبر ناشی می شود. ضرایب  $\gamma_0$  و  $P_{sat}$  به صورت خطی با افزایش دمش تغییر می کنند در حالی که، تغییرات آنها با طول فیبر به صورت غیرخطی است. تغییرات جمعیت وارون و خاصیت غیرخطی ضریب همپوشانی از فاکتورهای اصلی وابستگی  $\gamma_0$  و  $P_{sat}$  به پارامترهای توان دمش و طول فیبر می باشند.

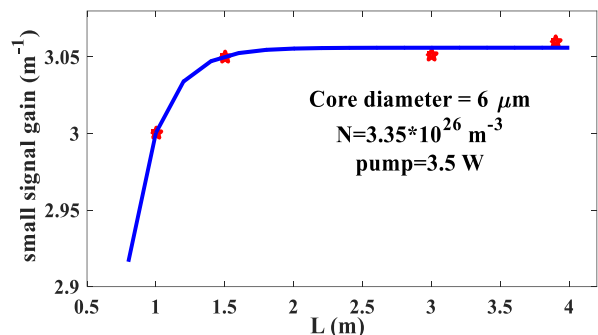
## مرجع ها

- [1] Parvin, P., et al., "Small signal gain and saturation intensity of a Yb:Silica fiber MOPA system". Optics & Laser Technology, 41(7): p. 885-891, 2009.
- [2] Mohammadian, S., et al., "Measurement of gain and saturation parameters of a single-mode Yb: silica fiber amplifier". Optical Fiber Technology, 19(5): p. 446-455, 2013.
- [3] Jeong, "Laser processing of engineering materials:principals,procedure and industrial application", Elsevier,2005.
- [4] Dignonnet,M.J., "Rare-earth doped fiber lasers and amplifiers", CRS press,2001.
- [5] Wang, Y. and C.-Q. Xu, "Modeling and optimization of Q-switched double-clad fiber lasers. Applied optics", 45(9): p. 2058-2071, 2006.
- [6] rantz, L.M. and J.S. Nodvik, "Theory of pulse propagation in a laser amplifier". Journal of Applied Physics, 34(8): p. 2346-2349, 1963.

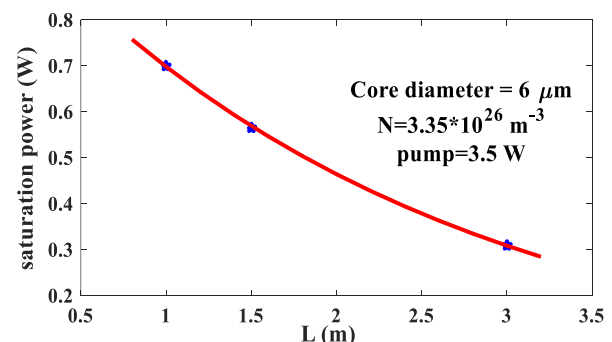


شکل ۵: تغییرات توان اشباع برحسب توان دمش ورودی

اثر تغییرات طولهای مختلف تقویت کننده روی  $\gamma_0$  و  $P_{sat}$  به دست آمده است و به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.  $\gamma_0$  تا طول بهینه به صورت نمایی افزایش می یابد و به تدریج با افزایش طول، به علت افت محیط بهره کاهش می یابد اما،  $P_{sat}$  به سبب پارامتر  $\Gamma_k$  افت پیدا می کند. بهره سیگنال کوچک به صورت تابعی نمایی تا طول ۱٫۵ متر افزایش می یابد و سپس یکنواخت می شود. مقادیر نمونه  $\gamma_0$  و  $P_{sat}$  در توان دمش ۳٫۵ W تقویت کننده به ترتیب برابر  $۲٫۸ m^{-1}$  و  $۰٫۳۷ W$  است.



شکل ۳: تغییرات بهره سیگنال کوچک برحسب طول تقویت کننده



شکل ۴: تغییرات توان اشباع برحسب طول تقویت کننده