

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. ۱۳۹۸ 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 ۲ دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ parvin@aut.ac.ir ۳ پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، پژوهشکده فوتونیک و فناوریهای کوانتومی؛ milchi@aeoi.org.ir

چکیده – در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای سی ستم نو سانگر –تقویت کننده فیبری سوئیچ Q دو غلافه آلاییده به ایتربیوم در بستر سیلیکا ارائه شده است. در ابتدا معادلات نرخ وابسته به زمان برا ساس روش تفا ضل محدود به روش عددی حل می شوند و مشخصات پالس خروجی به دست میآید. این پالس به منظور تقویت بیشتر وارد تقویت کننده می شود و ضرایب بهره و ا شباع با استفاده بهترین انطباق بین دادههای حاصل از حل معادلات نرخ و معادله تقویت گذرا، بر اساس روش حدایل محدود ان ای این به دست میآیند. در انتها، وابستگی پارامترهای مختلف کاواک روی ضرایب بهره و اشباع مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

كليد واژه- ضريب بهره، توان اشباع، سوئيچ Q، ليزر فيبري، نوسانگر-اصلي تقويت كننده-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 Qswitched 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.

$$N = N_1 + N_2 \tag{1}$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{N_2}{\tau} = \frac{\Gamma_P \lambda_P}{hcA} \left[ \sigma_a(\lambda_P) N_1 - \sigma_e(\lambda_P) N_2 \right] \times \left( P_P^+ + P_P^- \right)$$

$$+ \sum_k \frac{\Gamma_k \lambda_k}{hcA} \left[ \sigma_a(\lambda_k) N_1 - \sigma_e(\lambda_k) N_2 \right] \left( P_k^+ + P_k^- \right)$$
(Y)

$$\frac{\partial \boldsymbol{P}_{p}}{\partial z} + \frac{1}{\boldsymbol{v}_{p}} \frac{\partial \boldsymbol{P}_{p}}{\partial t} = -\Gamma_{p} [\boldsymbol{\sigma}_{e}(\boldsymbol{\lambda}_{p}) \boldsymbol{N}_{2} - \boldsymbol{\sigma}_{a}(\boldsymbol{\lambda}_{p}) \boldsymbol{N}_{1}] \boldsymbol{P}_{p} - \boldsymbol{\alpha}_{p} \boldsymbol{P}_{p}$$
(**Y**)

$$\frac{\partial p_{k}^{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{\upsilon_{k}} \frac{\partial p_{k}^{\pm}}{\partial t} = -\Gamma_{k} \left[ \sigma_{e}(\lambda_{k}) N_{2} - \sigma_{a}(\lambda_{k}) N_{1} \right] P_{k}^{\pm}$$

$$-S \alpha_{RS} P_{k}^{\pm} - \alpha_{s} P_{k}^{\pm} + 2 \sigma_{e}(\lambda_{k}) N_{2} \frac{h_{C}^{2}}{\lambda_{k}^{2}} \Delta \lambda_{k}, k = 1, ..., s$$
(\*)

که N بیانگر غلظت کل ماده آلاییده است، N<sub>1</sub> و N<sub>2</sub> به ترتیب جمعیت تراز پایین و بالا لیزر هستند،  $P_{\kappa}^{\pm}$  انتشار توان سیگنال در جهت مثبت و منفی محور Z در هسته فیبر است.  $P_{\kappa}$  میگنال در جهت مثبت و منفی محور Z در هسته فیبر است.  $P_{\kappa}$  توان سیگنال در فیبر،  $U_{p}$  و  $v_{s}$  سرعت گروه دمش و سیگنال در فیبر، C سرعت نور در خلاء،  $\tau$  طول عمر فلورسانس و A سطح ناحیه آلاییده فیبر است.  $(\Lambda)$  و  $\sigma_{a}(\lambda)$  به  $\tau_{c}(\lambda)$  مروران دمش و  $P_{s}$  سرعت نور در خلاء،  $\tau$  طول عمر فلورسانس و A سطح ناحیه آلاییده فیبر است.  $(\Lambda)$  و  $\sigma_{a}(\lambda)$  به  $\tau_{c}(\lambda)$  و  $\sigma_{a}(\lambda)$  میگنال در فیبر، C سرعت نور در خلاء،  $\tau$  طول عمر فلورسانس و A سطح ناحیه آلایده فیبر است.  $(\Lambda)_{s}$  و منور ( $\Lambda_{s}$ ) به ترتیب سطح مقطعهای جذب و گسیل ایتربیوم برای دمش و سیگنال است. S منویب پراکندگی رایلی، S ناحیه آلاییده فیبر و  $(\Lambda)_{a}$  و  $(\Lambda)_{a}$  و میوشانی بین دمش و ناحیه آلاییده فیبر و  $(\Lambda)_{a}$  و درم) و میگنال است. مقطع جذب و گسیل ایتربیوم برای دمش و سیگنال است. مقطع جذب و گسیل ایتربیوم برای دمش و سیگنال است. مقطع جذب و گسیل ایتربیوم برای دمش و سیگنال است. موئیچ Q به این مورت زیر درنظر گرفته میشود [ $\Lambda$ ]:

$$P_{p}^{+}(0) = \eta_{p} P_{p1}$$
 (2)

$$\mathbf{P}_{k}^{+}(0,t) = \mathbf{P}_{k}^{-}(0,t) \left[ \mathbf{R}_{HR}(\lambda_{k}) \mathbf{T}_{1}^{2}(t) \eta_{l}^{2} \eta_{cpl}^{2} + \mathbf{R}_{res} \right]$$
(8)

$$\mathbf{P}_{k}^{-}(\mathbf{L},t) = \mathbf{P}_{k}^{+}(\mathbf{L},t) \mathbf{R}_{\mathrm{OC}}(\lambda_{k}) \eta_{2}^{2}, \mathbf{K} = 1,...,s$$
 (Y)

HR و  $R_{OC}$  به ترتیب ضریب انعکاس توری براگ R<sub>HR</sub> و  $R_{OC}$  و  $\eta_p$  ضریب تزویج دمش،  $\eta_{cpl}$  سیگنال عبوری تزویج گر و مش،  $\eta_p$  ضریب تزویج گر تویج گر دمش،  $\eta_1$  اتلاف سیگنال عبوری از تزویج گر R<sub>res</sub> ،FBG اپتیکی،  $\eta_2$  مربوط به اتلاف اتصال بین فیبر و R<sub>HR</sub> =  $R_{HR}$  و  $R_{0}/9$  و  $R_{0}/9$  مادلات میادلات میاشند. 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 خاکی ایتربیوم درلیزرهای فیبری توان بالا که در مد پالسی کار می کنند، بسیار کاربردی و مورد توجه هستند [۳–۴]. از این رو، مقالات متعددی به مدلسازی عددی و اندازه گیری 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 آلاییده شده به ایتربیوم 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.

#### تئورى

طرح لیزر فیبری دوغلافی سوئیچ Q توان بالا ایتربیوم 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 می گردد. توری فیبری براگ با ضریب بازتاب بالا (HR) سبب انعکاس پرتو عبوری از مریب می گردد. توری براگ با طول موج مرکزی  $\lambda_{\rm S}$  و انعکاس کمتر (LR) در انتهای نوسانگر نقش جفت کنندگی خروجی را ایفا می کند. بنابراین، نوسان بین دو توری ایجاد می شود.





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

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

$$\mathbf{P}_{\mathrm{S}}^{+}(0,t) = \mathbf{p}_{\mathrm{out}}(0,t) \times \boldsymbol{\eta} \tag{A}$$

که Pout بیانگر توان خروجی نوسانگر و η ضریب اتلاف جفت شدگی است. معادله تقویت گذرا (فرانتز-نادویک) نیز به صورت زیر تعریف می شود [۶]:

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

که در آن L طول فیبر است.

### بحث و نتايج

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

جدول ۱ :یارامترهای لیزر فیبری YDDC

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\lambda_{\mathrm{s}}$	۱۰۸۰ nm	τ	۱/۳ ms
$\lambda_p$	۹۱۵ nm	R <sub>HR</sub>	۹۹,۹۹ ½
А	$\mathfrak{F}_{/}\mathfrak{q} \times \mathfrak{l} \cdot \mathfrak{l} \cdot \mathfrak{m}^{-2}$	R <sub>oc</sub>	۴ ٪.
L	۳m	$N_0$	$r_{/}$ and $\cdot$ 1 - $^{r_{\mathcal{P}}}m^{-3}$
α <sub>P</sub>	$\cdot/\cdot$ A dB/m	$\alpha_{s}$	ヽ・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.



شكل ٢: شكل پالس خروجی نوسانگر - تقویت كننده

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 دمش 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 شده است. با استفاده از روش LSM و انطباق حاصله میتوان  $\gamma_0$  و  $p_{sat}$  را به دست آورد که برای مثال در توان دمش W



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

تغییرات  $\gamma_0 \ e_{sat} \ P_{sat}$  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 دمش وابسته است. توان اشباع به علت ضریب همپوشانی ( $\Gamma_k$ )، به صورت خطی با توان دمش افزایش مییابد.



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

### نتيجهگيرى

در این مقاله پارامترهای بهره سیگنال کوچک و توان اشباع در سيستم MOPA سوئيچ Q ايتربيوم-سيليكا بررسي 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 میشود. ضرایب γ<sub>0</sub> و P<sub>sat</sub> به صورت خطی با افزایش دمش تغییر می کنند در حالی که، تغییرات آنها با طول فيبر به صورت غيرخطي است. تغييرات جمعيت وارون و خاصیت غیرخطی ضریب همیوشانی از فاکتورهای اصلی وابستگی γo و Psat به یارامترهای توان دمش و طول فیبر مىباشند.

#### مرجعها

- [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] Digonnet,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.



 $P_{sat}$  اثر تغییرات طولهای مختلف تقویت کننده روی  $\gamma_0$  و  $\gamma_0$  اثر تغییرات طولهای مختلف تقویت کننده روی  $\gamma_0$  و  $\gamma$  نشان به دست آمده است و به ترتیب در شکلهای  $\gamma$  و  $\gamma$  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  $\pi$  افت پیدا می کند. بهره سیگنال کوچک به صورت تابعی نمایی تا طول  $\gamma_0$  متر افزایش می یابد و سپس یکنواخت می شود. مقادیر نمونه  $\gamma_0$  افت ید بر برابر افزایش می یابد و سپس یکنواخت می شود. مقادیر نمونه  $\gamma_0$  مراب  $P_{sat}$  در توان دمش  $\gamma_0$  تقویت کننده به ترتیب برابر  $\gamma_0$  متر  $P_{sat}$ 



شكل ۴: تغييرات توان اشباع برحسب طول تقويت كننده