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[۱]، پرویز پروین[۲] و مریم ایلچی[۳]

[۱]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 سیستم نوسانگر-تقویت کننده فیبری سوئیچ Q دو غلافه آلاییده به ایتربیوم در بستر سیلیکا ارائه شده است. در ابتدا معادلات نرخ وابسته به زمان براساس روش تفاضل 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 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[1], Parviz Parvin[2], and Maryam Eilchi[3]

[1]Photonics Engineering Group, Department of Physics, Amirkabir University of Technology
[2]Photonics Engineering Group, Department of Physics, Amirkabir University of Technology
[3]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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

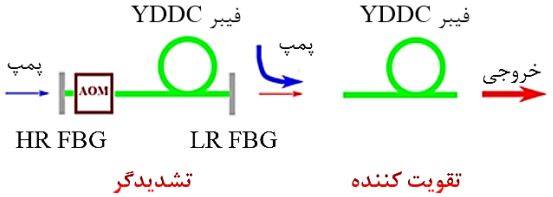
مقدمه

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 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 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.

تئوری

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 می‌گردد. توری فیبری براگ با ضریب بازتاب بالا (HR) سبب انعکاس پرتو عبوری از AOM می‌گردد. توری براگ با طول موج مرکزی λ_S و انعکاس کمتر (LR) در انتهای نوسانگر نقش جفت کنندگی 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 ۱-۴ بیان می‌شوند [۵]:

$$N = N_1 + N_2 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{N_2}{\tau} = \frac{\Gamma_P \lambda_P}{hcA}\left[\sigma_a(\lambda_P)N_1 - \sigma_e(\lambda_p)N_2\right]\times(P_P^+ + P_P^-) + \sum_k \frac{\Gamma_k \lambda_k}{hcA}\left[\sigma_a(\lambda_k)N_1 - \sigma_e(\lambda_k)N_2\right](P_k^+ + P_k^-) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial P_P}{\partial z} + \frac{1}{\upsilon_p}\frac{\partial P_p}{\partial t} = -\Gamma_p\left[\sigma_e(\lambda_p)N_2 - \sigma_a(\lambda_p)N_1\right]P_p - \alpha_p P_p \quad (۳)$$

$$\frac{\partial P_k^{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{\upsilon_k}\frac{\partial P_k^{\pm}}{\partial t} = -\Gamma_k\left[\sigma_e(\lambda_k)N_2 - \sigma_a(\lambda_k)N_1\right]P_k^{\pm} - S\alpha_{RS}P_k^{\pm} - \alpha_s P_k^{\pm} + 2\sigma_e(\lambda_k)N_2\frac{hc^2}{\lambda_k^3}\Delta\lambda_k, k = 1,\ldots,s \quad (۴)$$

که N بیانگر غلظت کل ماده آلاییده 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، υ_p و υ_S سرعت گروه دمش و سیگنال در فیبر، C سرعت نور در خلاء، τ طول عمر فلورسانس و A سطح ناحیه آلاییده فیبر است. $\sigma_a(\lambda)$ و $\sigma_e(\lambda)$ به ترتیب سطح مقطع‌های جذب و گسیل ایتربیوم برای دمش و سیگنال است. α_P (α_S) ضریب تضعیف فیبر دمش (سیگنال)، Γ_p (Γ_k) فاکتور همپوشانی بین دمش و ناحیه آلاییده فیبر است. α_{RS} ضریب پراکندگی رایلی، S ضریب جذب هسته فیبر و $\sigma_a(\lambda)$ و $\sigma_e(\lambda)$ به ترتیب سطح مقطع جذب و گسیل ایتربیوم برای دمش و سیگنال است.

شرایط مرزی مربوط به معادلات مشتق جزئی در حالت سوئیچ Q به این صورت زیر درنظر گرفته می‌شود [۵]:

$$P_p^+(0) = \eta_p P_{p1} \quad (۵)$$

$$P_k^+(0,t) = P_k^-(0,t)\left[R_{HR}(\lambda_k)T_1^2(t)\eta_1^2\eta_{cpl}^2 + R_{res}\right] \quad (۶)$$

$$P_k^-(L,t) = P_k^+(L,t)R_{OC}(\lambda_k)\eta_2^2, K = 1,\ldots,s \quad (۷)$$

که R_{HR} و R_{OC} به ترتیب ضریب انعکاس توری براگ HR و OC، η_p ضریب تزویج دمش، η_{cpl} سیگنال عبوری تزویج‌گر دمش، η_1 اتلاف سیگنال عبوری از تزویج‌گر اپتیکی، η_2 مربوط به اتلاف اتصال بین فیبر و FBG، R_{res} باقیمانده انعکاس سر فیبر، R_{oc} = ٪۴ و R_{HR} = ٪۹۹٫۹۹ می‌باشند. به طور مشابه، قسمت تقویت کننده از معادلات

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

۱-۴ 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:

$$P_S^+(0,t) = p_{out}(0,t) \times \eta \qquad (۸)$$

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

$$P_{out} = P_{sat} \ln\left\{1 + \left[\exp\left(\frac{P_{in}}{P_{sat}}\right) - 1\right]\exp(\gamma_0 L)\right\} \qquad (۹)$$

که در آن L طول فیبر است.

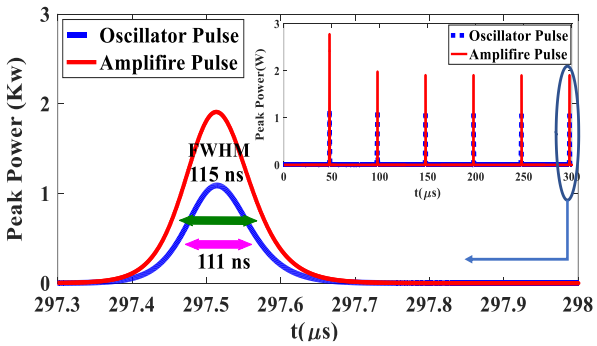
بحث و نتایج

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

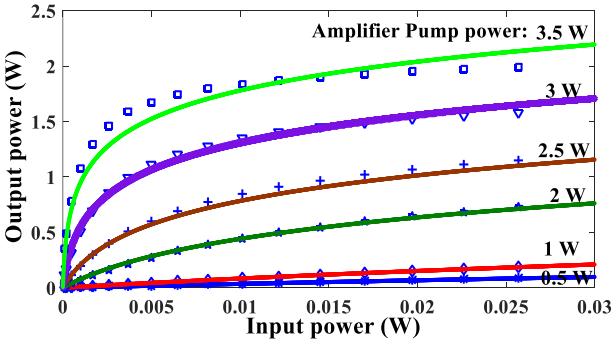
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
λ_s	۱۰۸۰ nm	τ	۱٫۳ ms
λ_p	۹۱۵ nm	R_{HR}	۹۹٫۹۹ ٪
A	۴٫۹ × ۱۰ $^{-۱۰}$ m^{-2}	R_{oc}	۴ ٪
L	۳ m	N_0	۳٫۳۵×۱۰^{۲۶} m^{-3}
α_P	۰/۰۸ dB/m	α_s	۱۰dB/m

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.



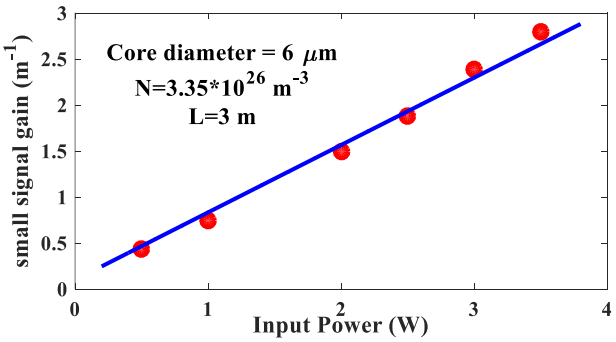
شکل ۲: شکل پالس خروجی نوسانگر- تقویت کننده

به منظور محاسبه بهره سیگنال کوچک (γ_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 (۹) است. با استفاده از روش LSM و انطباق حاصله می‌توان γ_0 و P_{sat} را به دست آورد که برای مثال در توان دمش W ۳ به ترتیب برابر ۲٫۵ m^{-1} و ۰٫۳۶ W است.



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

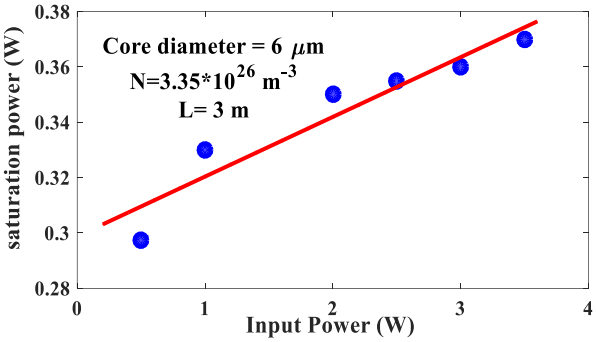
تغییرات γ_0 و P_{sat} برحسب توان‌های ورودی به تقویت کننده به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در حالت توان پایین فیبر، γ_0 به صورت خطی به توان دمش وابسته است. توان اشباع به علت ضریب همپوشانی (Γ_k)، به صورت خطی با توان دمش افزایش می‌یابد.



شکل ۴: تغییرات بهره سیگنال کوچک برحسب توان دمش ورودی

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

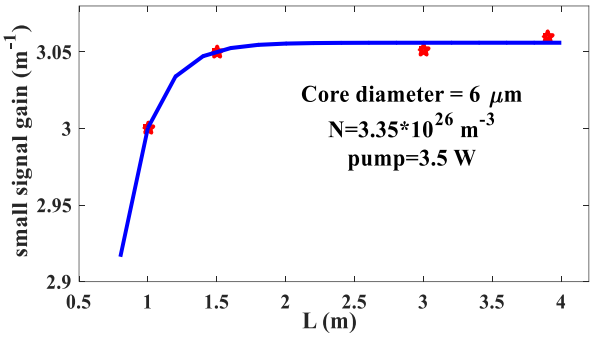
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]



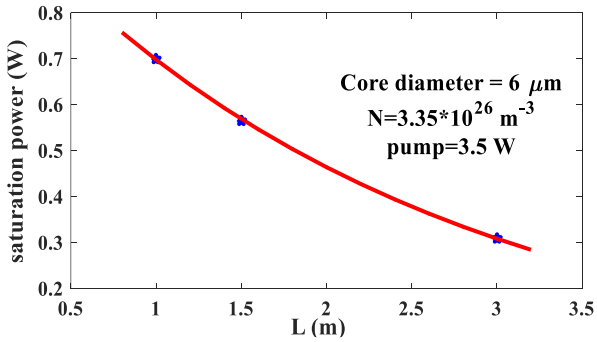
شکل ۵: تغییرات توان اشباع برحسب توان دمش ورودی

اثر تغییرات طول‌های مختلف تقویت کننده روی γ_0 و P_{sat} به دست آمده است و به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. γ_0 تا طول بهینه به صورت نمایی افزایش می‌یابد و به تدریج با افزایش طول، به علت افت محیط بهره کاهش می‌یابد اما، P_{sat} به سبب پارامتر Γ_k افت پیدا می‌کند.

بهره سیگنال کوچک به صورت تابعی نمایی تا طول ۱٫۵ متر افزایش می‌یابد و سپس یکنواخت می‌شود. مقادیر نمونه γ_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

نتیجه‌گیری

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 γ_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_0 و P_{sat} به صورت خطی با افزایش دمش تغییر می‌کنند در حالی که، تغییرات آنها با طول فیبر به صورت غیرخطی است. تغییرات جمعیت وارون و خاصیت غیرخطی ضریب همپوشانی از فاکتورهای اصلی وابستگی γ_0 و P_{sat} به پارامترهای توان دمش و طول فیبر می‌باشند.

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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]