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

شبیه سازی و بهینه سازی لیزر تاری پیوسته آلاییده به تولیوم

درویشی بهلولی، سجّاد ؛ حاتمی، محسن

گروه فوتونیک، دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شیراز، بلوار مدرس، شیراز

Sajjad.darvishi.dobedo@gmail.com - hatami@sutech.ac.ir

چکیده – در این مقاله، بخش اصلی یک لیزر تاری که تقویت کننده و کاواک آن می باشد را شبیه سازی و بر اساس پارامترهای موثر بهینه سازی کرده‌ایم. لیزر تاری انتخاب شده در ۱۹۰۸ نانومتری کار می‌کند و توسط لیزر دیودی در طول موج ۷۹۰ نانومتر با توان پمپ ۴۴۳ وات پمپ می‌شود. پارامترهای مهمی چون توان پمپ ورودی، بازتابندگی توری براگ تاری (که به عنوان آینه در کاواک لیزر مورد استفاده قرار می‌گیرد) و طول تار فعال تعیین کننده مقدار توان خروجی لیزر هستند. در این مقاله با بهینه کردن طول تار فعال و بازتابندگی توری براگ تاری (به عنوان آینه انتهایی کاواک) مقدار بیشینه توان خروجی را بدست آورده‌ایم. نتایج این شبیه سازی می‌تواند برای طراحی کامل لیزرهای تاری پیوسته و افزایش کارایی لیزر با بهینه کردن دیگر پارامترهای مهم این نوع از لیزرها مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه – لیزر تاری، توری براگ تاری

Simulation and optimization of CW thulium doped fiber laser

Darvishi Bohlooli, Sajjad ; Hatami, Mohsen

Photonic group, department of physics, shiraz university of technology, shiraz

Sajjad.darvishi.dobedo@gmail.com - hatami@sutech.ac.ir

Abstract - In this paper, we simulate the main part of a fiber laser which is the amplifier and a cavity and optimized based on effective parameters. The chosen fiber laser operates in 1908 nm and pumped by diode laser at 790 nm with pump power of 443 Watt. The important parameters such as input pump power, fiber Bragg grating reflectivity (which use as a mirror in laser cavity) and active fiber length determine the amount of laser output power. In this paper, by optimization the active fiber length and the fiber Bragg grating reflectivity (as the end mirror of the cavity) we have obtained the amount of maximum output of fiber laser. The results of this simulation can use for comprehensive design of CW fiber laser and Increase the laser efficiency by optimization the other important parameters of this type of lasers.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

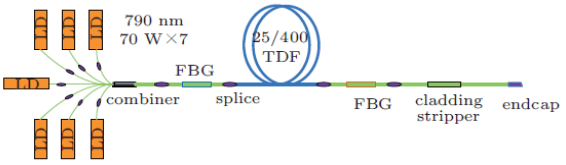
Keywords: Fiber laser, Fiber Bragg grating

مقدمه

عناصر خاکی زیادی همچون اربیوم[۱] و تولیوم[۲] می‌توانند برای ساخت لیزرهای تاری مورد استفاده قرار گیرند که در ناحیه طول موجی وسیعی از ۰/۴ تا ۴ میکرومتر عمل می‌کنند[۱]. بعد از ساخت اولین لیزر در سال ۱۹۶۰، اولین لیزر تاری دنیا در سال ۱۹۶۱ ساخته شد که در آن از تار آلاییده به ND[۳] استفاده شد[۲]. لیزرهای تاری آلاییده به تولیوم به خاطر عملکرد در ناحیه طول موجی ۲۰۰۰ نانومتری کاربردهای مهم و متنوعی در زمینه رادار لیزری، ارتباطات نوری فضای آزاد و در پزشکی برای جراحی دارند [۳]. به همین جهت شبیه‌سازی تقویت‌کننده‌ها و لیزرهای تاری گام مهمی در بهبود، پیشرفت و توسعه این حوزه های ذکر شده به شمار می‌رود.

چیدمان آزمایشگاهی

چیدمان لیزری که در شکل ۱ نشان داده شده است از یک مقاله که به صورت آزمایشگاهی روی آن کار کرده‌اند گرفته شده است[۴]. در اینجا کاواک لیزر را شبیه سازی و با تغییر پارامترها توان خروجی را بهینه کرده ایم.

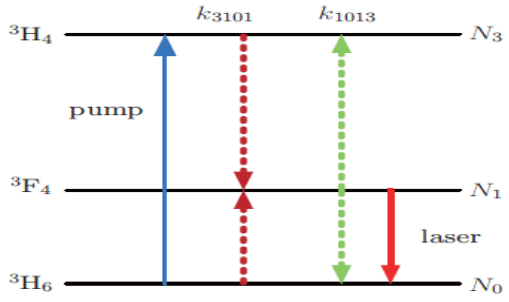


شکل ۱: نمایی از لیزر تمام تاری آلاییده به تولیوم[۴].

در قسمت پمپ، هفت لیزر دیودی به یک ترکیب‌کننده متصل شده است که هر کدام از آنها توان خروجی بیشینه هفتاد وات در طول موج ۷۹۰ نانومتری تولید می‌کنند. ادامه تار به یک FBG[۴] می‌رسد که برای طول موج لیزر ۱۹۰۸ نانومتری بازتاب ۹۹ درصدی دارد. این توری براگ به تار فعال آلاییده به تولیوم می‌رسد. طول تار فعال حدود سه متر در نظر گرفته شده است. ادامه تار فعال به FBG دوم (توری براگ انتهایی) با بازتابندگی کمتر (در اینجا حدود ۱۵ درصد)، برای طول موج لیزر ۱۹۰۸ نانومتر به انتهای تار فعال متصل شده است و در نهایت لیز تولید شده از سمت راست خارج می‌شود. بیشینه توان خروجی با استفاده از توان پمپ ۴۴۳ وات به حدود۱۴۶ وات می‌رسد.

تئوری TDFL[۵]

در شکل ۲ پمپاژ از تراز پایه N_0 به تراز N_3 در ۷۹۰ نانومتر صورت می‌گیرد و بعد از واهلش اتم‌ها به تراز N_1، گذار اتم‌ها از تراز بالایی لیزر ($^3F_4$) به تراز پایه ($^3H_6$) منجر به تولید لیز در ۱۹۰۸ نانومتر می‌شود. در اینجا از تراز N_2 به خاطر طول عمر تراز بسیار پایین و ناچیز بودن چگالی اتم‌ها نسبت به ترازهای دیگر صرف‌نظر شده است[۳].



شکل ۲: نمای طرح پمپ از N_0 به N_3 برای یون TM^{3+}[۴].

معادلات نرخ با توجه به شکل ۲ در مقالات متعددی قابل دسترسی است.[۵], [۶]. برای معادله نرخ هر کدام از ترازها بعضی از پارامترها باعث افزایش جمعیت تراز و برخی باعث

---

۱ Erbium

۲ Thulium

۳ Neodymium

۴ Fiber Bragg grating

۵ Thulium-doped fiber laser

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

کاهش آن می‌شوند از جمله این پارامترها نرخ پمپاژ، گسیل القایی، گسیل خود به خودی و واهلش متقابل هستند. با برابر صفر قرار دادن معادلات نرخ در حالت پایا و اضافه کردن نتایج این معادلات به معادلات انتشار می‌توان به توان پمپ و سیگنال در هر نقطه از طول تار رسید. معادلات انتشار بدین صورت نوشته می‌شود[۴]:

$$\frac{dP_P^+(z)}{dt} = -\Gamma_p[N_0\sigma_a(\lambda_p) + N_1\sigma_e(\lambda_p)] \times p_p^+(z) \quad (۱)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dt} = \Gamma_p[N_0\sigma_a(\lambda_p) - N_1\sigma_e(\lambda_p)] \times P_p^-(z) \quad (۲)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dt} = \Gamma_s[N_1\sigma_e(\lambda_s) - N_0\sigma_a(\lambda_s)] \times P_s^+(z) \quad (۳)$$

$$\frac{dP_s^-(z)}{dt} = -\Gamma_s[N_1\sigma_e(\lambda_s) - N_0\sigma_a(\lambda_s)] \times P_s^-(z) \quad (۴)$$

در اینجا N_0 ، N_1 و N_3 به ترتیب چگالی اتم‌ها در تراز پایه ، یک و سه و N غلظت کل یون‌ها، λ_p و λ_s به ترتیب طول موج پمپ و سیگنال، P^+_P و P^-_P به ترتیب توان پمپ رو به جلو و عقب، Γ_P فاکتور هم‌پوشانی برای پمپ، $\sigma_a(\lambda_p)$ سطح مقطع جذب نور پمپ، $\sigma_e(\lambda_p)$ سطح مقطع گسیل نور پمپ می‌باشد. ضرائب دیگر با اندیس S مربوط به طول موج سیگنال، با مفهوم یکسان برای طول موج پمپ می‌باشد. در این معادلات حاصل‌ضرب توان پمپ یا سیگنال اولیه در وارونی جمعیت (که از تفاضل اتم‌ها در تراز بالایی از تراز پایینی بدست می‌آید) مقدار پمپ و سیگنال خروجی را نشان می‌دهد. مقادیر این پارامترها را در روابط جایگذاری می‌کنیم[۶]–[۸]. برای شرایط مرزی داریم[۴]:

$$P_s^+(0) = R_1P_s^-(0) \quad (۵)$$

$$P_s^-(L) = R_2P_s^+(L) \quad (۶)$$

در اینجا L طول تار است. R_1 = 99 % و بازتابندگی FBG سمت چپ برای طول موج سیگنال، R_2 بازتابندگی FBG سمت راست برای سیگنال می‌باشد[۴]. برای شبیه‌سازی ابتدا معادلات نرخ را با روش رانگ کوتا درجه چهار[۶] حل و در ادامه معادلات دیفرانسیل انتشار را با روش نیوتون-رافسون و ایتریشن[۷] برای یک رفت حل کرده ایم. در برگشت همان معادلات برقرار است با این تفاوت که این بار شرایط مرزی مقادیر خروجی در رفت می باشد.

نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها

در جدول ۱ توان خروجی بدست آمده برای مقادیر مختلف طول تار فعال از شبیه سازی انجام شده نشان داده شده است. توان پمپ ورودی ۴۴۳ وات می باشد. طبق جدول ۱ توان خروجی برای تار با طول۲/۵ متر بیشترین مقدار است.

جدول ۱: توان خروجی لیزر بر اساس مقادیر مختلف طول تار

ردیف	طول (متر)	توان خروجی(وات)
۱	۰/۵	۵۱/۴۶
۲	۱	۸۸/۳۱
۳	۱/۵	۱۲۵/۸
۴	۲	۱۴۶/۲
۵	۲/۵	۱۴۶/۴
۶	۳	۱۴۳
۷	۳/۵	۱۳۹/۴

افزایش بازتابندگی توری براگ سمت راست باعث می‌شود لیز تولید شده بیشتری به درون کاواک بازگردد که منجر

[۶] Fourth-Order Runge-Kutta

[۷] Iteration

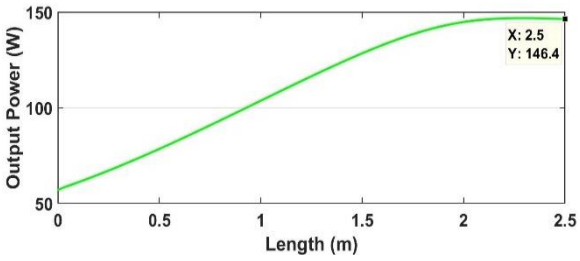
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

به افزایش چگالی و وارونی جمعیت و در نهایت افزایش تولید لیز می‌گردد. اما افزایش بیش از حد چگالی سیگنال منجر به آسیب دمایی در سیستم می‌شود. ما به دنبال درصد بازتابندگی مطلوب هستیم تا با آسیب دمایی کمتر، بیشترین توان خروجی را داشته باشیم. طبق جدول شماره ۲ توان خروجی لیزر بر حسب مقدارهای مختلف بازتابندگی توری براگ تاری شبیه سازی شده، نشان داده شده است. برای تمام مقادیر طول تار فعال ۲/۵ متر و توان پمپ ورودی ۴۴۳ وات می‌باشد.بیشینه توان خروجی در ۱۵ درصد است.

جدول ۲: توان خروجی لیزر بر اساس مقادیر مختلف بازتابندگی توری براگ انتهایی

ردیف	بازتابندگی توری براگ انتهایی(٪)	توان خروجی (وات)
۱	۵	۱۴۴/۳
۲	۱۰	۱۴۴/۶
۳	۱۵	۱۴۶/۴
۴	۲۰	۱۴۶
۵	۲۵	۱۴۴/۲
۶	۳۰	۱۴۱/۱



شکل ۳: نمودار شبیه سازی شده توان خروجی لیزر برای طول ۲/۵ متر و بازتابندگی ۱۵ درصد.

شکل ۳ شبیه سازی انجام شده برای طول تار فعال ۲/۵ متر و بازتابندگی ۱۵ درصدی توری براگ را نشان می‌دهد. توان خروجی ۱۴۶/۴ وات می‌باشد.

نتیجه گیری

با کمک معادلات نرخ و انتشار برای تار آلاییده به تولیوم و با استفاده از نرم افزار متلب و با روش ایتریشن و رانگ‌کوتا درجه چهارتوانستیم یک کاواک لیزر تاری را شبیه سازی کنیم که در آن پس از رفت و برگشت‌های متعدد فوتون‌ها بین دو آینه (در اینجا FBG) و تقویت‌هایی که در هر بار عبور از ماده فعال رخ می‌داد به وضعیتی می‌رسیم که دیگر این رفت و برگشت‌ها منجر به افزایش لیز تولیدی نشده و توان تولیدی در مقدار معینی ثابت می‌شود. بهینه کردن پارامتر طول تار فعال طبق جدول ۱ با داشتن بیشترین توان با کمترین مقدار تار مصرفی در طول ۲/۵ متر بدست آمد و بازتابندگی توری براگ انتهایی، با توجه به جدول ۲ بازتاب ۱۵ درصد با بیشترین توان خروجی و کنترل آسیب دمایی به عنوان بازتاب توری براگ بهینه بدست آوریم.

منابع

[1] G. Agrawal, *Applications of nonlinear fiber optics*, pp. 201, 2001.

[2] E. Snitzer, “Optical Maser Action of Nd +3 in a Barium Crown Glass,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 7, pp. 444–446, 1961.

[3] Khamis, M. A., and K. Ennser. “Model for a thulium-doped silica fiber amplifier pumped at 1558 nm and 793 nm,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 4, pp. 76-80, 2016.

[4] Z.-Y. Hu, P. Yan, Q.-R. Xiao, Q. Liu, and M.-L. Gong, “227-W output all-fiberized Tm-doped fiber laser at 1908 nm,” *Chinese Phys. B*, vol. 23, pp. 104206, 2014.

[5] Liao, Suying, Mali Gong, and Haitao Zhang. “Influence of mode distortion on the transverse mode competition in large-mode-area amplifiers,” *Optics Communications.*, vol. 3, pp. 406-412, 2009.

[6] Jackson, Stuart D., and Terence A. King. “Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers,” *Journal of Lightwave Technology.*, vol. 5, pp. 948, 1999.

[7] Rustad, Gunnar, and Knut Stenersen. “Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for upconversion and ground-state depletion,” *IEEE Journal of Quantum Electronics.*, vol. 9, pp. 1645-1656, 1996.

[8] Jackson, Stuart D. “High-power fiber lasers for the shortwave infrared,” *Laser Technology for Defense and Security.*, Vol. 5, pp. 7686, 2010

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]