



## بهینه‌سازی لیزر فیبری دو غلافی آلاییده به ایتربیم ( $Yb^{3+}$ )

زهره لعلی دستجردی<sup>۱</sup>؛ علیرضا بنانج<sup>۲</sup>؛ پرویز پروین<sup>۲،۳</sup>؛ مریم ایلچی قرآنی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی - واحد شوشتر، <sup>۲</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - پژوهشکده لیزر و اپتیک، تهران

<sup>۳</sup>دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

چکیده - در این مقاله به طراحی حالت بهینه‌ای از لیزر فیبری آغشته به عنصر ایتربیم،  $Yb^{3+}$  پرداخته شده است. در این طراحی تاثیر پارامترهایی همچون توان پمپ، میزان آلاییدگی، طول فیبر و ضرایب بازتابنده‌های براگ بر خروجی لیزر با استفاده از حل معادلات آهنگ، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که طول بهینه لیزر با افزایش توان پمپاژ افزایش و با افزایش غلظت آلاینده و ضریب بازتاب خروجی لیزر کاهش می‌یابد و برای توان پمپاژهای بالا مستقل از توان پمپ است. همچنین مقادیر بهینه‌ای برای میزان آلاییدگی و ضریب بازتاب خروجی لیزر نیز بدست آمده است.

کلید واژه - لیزر فیبری آلاییده به ایتربیم، طراحی بهینه، محاسبات عددی

کد PACS - 060.3510

ویژگی‌ها باعث گسترش لیزرهای پرتوان آلاییده به  $Yb^{3+}$  شده است [۱،۲].

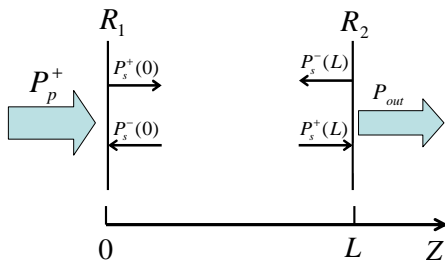
بدلیل غیرخطی بودن معادلات آهنگ در لیزر فیبری آلاییده به  $Yb^{3+}$ ، بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر خروجی لیزر بطور مستقیم قابل انجام نیست و برای این منظور باید معادلات آهنگ را به روش تحلیلی یا عددی حل نمود. در کارهای گزارش شده به روش تحلیلی برای حل معادلات از تقریب‌هایی همچون نادیده گرفتن اثر نایکنواختی پمپ و یا اتلاف فیبر [۱،۳،۴] استفاده شده است. در این مقاله به منظور انجام یک طراحی بهینه، با حل عددی معادلات آهنگ به بررسی اثر پارامترهای مختلف همچون توان پمپ، میزان آلاییدگی، طول فیبر و ضرایب بازتابنده‌های براگ بر خروجی لیزر فیبری دو غلافی آلاییده به  $Yb^{3+}$  پرداخته و در نهایت حالت‌های بهینه برای طراحی این نوع لیزر حاصل شده

### ۱- مقدمه

امروزه طراحی و ساخت لیزرهای فیبری آغشته به عناصر خاکی کمیاب به عنوان لیزرهای پرتوان بسیار مورد توجه است. لیزرهای فیبری مزایای ویژه‌ای نسبت به سایر لیزرهای حالت جامد دارند که عامل اصلی پیشرفت سریع آنها در عرصه‌های صنعت، پزشکی و مخابرات نوری بوده است. از مزایای لیزرهای فیبری بازدهی زیاد، بالا بودن نسبت سطح به حجم، کیفیت باریکه‌ی خروجی و توان بالا می‌باشد بطوریکه خروجی‌هایی تا  $2KW$  نیز گزارش شده است [۱]. این لیزرهای پرتوان از فیبرهای دو غلافی تشکیل شده‌اند که هسته‌ی آلاییده‌ی به عنصر خاکی نادر را دربر می‌گیرند. از میان انواع یون‌های خاکی نادر، یون  $Yb^{3+}$  ویژگی‌های خاصی همچون سادگی سطوح انرژی، طول عمر طولانی تراز بالا، بازدهی کوانتومی بالا و طیف جذب پهن را دارد که این

لیزر رفت و بازگشتی ( $P_s^\pm$ ) در طول فیبر را نشان می‌دهد. است.

معادلات (۲) و (۳) بیانگر تغییرات توان‌های پمپ و لیزر در حالت رفت و برگشت، با چگالی جمعیت در تراز بالا، با در نظر گرفتن تلفات پمپ و لیزر می‌باشند، بطوریکه  $N$  غلظت



شکل ۱: نمایی از یک لیزر فیبری با تزریق پمپ از ابتدای فیبر

یونهای  $Yb^{3+}$  در هسته‌ی فیبر با سطح مقطع  $A$  می‌باشد،  $\Gamma_p$  و  $\Gamma_s$  بترتیب فاکتورهای پرشوندگی<sup>۲</sup> توان‌های پمپ و لیزر،  $\sigma_{ap}(\sigma_{as})$  و  $\sigma_{ep}(\sigma_{es})$  بترتیب سطح مقطع‌های جذب و تابش برای پمپ (سیگنال)،  $\alpha_p$  و  $\alpha_s$  تلفات پراکندگی در فرکانس پمپ و لیزر،  $\tau$  طول عمر تابش تراز برانگیخته و  $h$  ثابت پلانک می‌باشند.

### ۳- محاسبات عددی

با توجه به ساختار لیزرهای فیبری و وجود بازتابنده‌های براگ در دو انتهای فیبر، شرایط مرزی حاکم به صورت زیر است [۵]:

$$P_s^+(\cdot) = R_1 P_s^-(\cdot) \quad (4)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \quad (5)$$

بطوریکه  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب ضرایب بازتاب براگ ورودی و خروجی، واقع در  $z=0$  و  $z=L$  می‌باشند و فقط نور لیزر را بازتاب می‌کنند. معادلات (۱-۳) معادلات جفت‌شده‌ی غیرخطی مرتبه اول هستند که برای حل آنها از روش پیشگو-اصلاحگر<sup>۳</sup> مرتبه‌ی پنجم و برای برآورده کردن

### ۲- معادلات آهنگ

ایتربیم از جمله‌ی عناصر خاکی نادر است که به دلیل بزرگی پهنای جذب ( $850-1070\text{nm}$ )، قابلیت پمپاژ توسط طیف وسیعی از لیزرهای حالت جامد را داراست و طیف فلئوئورسانس آن نیز در محدوده‌ی ( $970-1200\text{nm}$ ) رخ می‌دهد که ناشی از گذار  ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$  می‌باشد. یک لیزر فیبری آلاینده به  $Yb^{3+}$  به طول  $L$  را در نظر می‌گیریم که پمپ به درون غلاف داخلی تزریق شده و سیگنال لیزری در مغزی آن تولید می‌شود. شکل ۱ نمایی از یک لیزر فیبری را نشان می‌دهد که در آن پمپ از ابتدای فیبر به آن تزریق می‌شود. در دو انتهای فیبر دو بازتابنده‌ی براگ<sup>۱</sup> قرار گرفته‌است و سیستم توسط لیزرهای دیودی پمپ می‌شود. معادلات آهنگ برای یک لیزر فیبری پیوسته‌ی سه‌ترازه در حالت پایا به صورت زیر می‌باشند [۵]:

$$\frac{N_T(z)}{N} = \frac{\frac{(P_p^+(z)+P_p^-(z))\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{(P_s^+(z)+P_s^-(z))\sigma_{as}\Gamma_s}{h\nu_s A}}{\frac{(P_p^+(z)+P_p^-(z))(\sigma_{ep}+\sigma_{ap})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{(P_s^+(z)+P_s^-(z))(\sigma_{es}+\sigma_{as})\Gamma_s}{h\nu_s A}} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap} N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_T(z)] P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z) \quad (2)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{as} + \sigma_{es}) N_T(z) - \sigma_{as} N] P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z) \quad (3)$$

در این معادلات علامت‌های مثبت و منفی، جهت انتشار نور در راستای  $\pm z$  را نشان می‌دهند. معادله‌ی (۱) وابستگی جمعیت یون‌های  $Yb^{3+}$  در تراز بالا،  $N_T(z)$ ، را به توان باریکه‌های پمپ رفت و بازگشتی ( $P_p^\pm$ ) و توان باریکه‌های

<sup>2</sup> Power filling factor

<sup>3</sup> Predictor-corrector

<sup>1</sup> Distributed Bragg Reflector

وابستگی کمتری به توان پمپاژ دارد و به‌ازای توان‌های پمپاژ بالاتر از  $70W$  طول بهینه به مقدار ثابتی می‌رسد و در نتیجه می‌توان از لیزرها با طول یکسان برای بازه‌ای از توان‌های پمپاژ و لیزر استفاده نمود.

شکل ۵ طول بهینه را به‌صورت تابعی از غلظت آلاینده برای دو ضریب بازتاب  $R_p = 0.02, 0.08$  نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت آلاینده و ضریب بازتاب  $R_p$  واقع در  $z=L$ ، طول بهینه کاهش می‌یابد. بنابراین برای طراحی لیزری با طول کمتر لازم است که از فیبری با غلظت آلاییدگی بیشتر و بازتابنده‌ای با ضریب بازتاب بیشتر در انتهای فیبر استفاده شود. از دیگر پارامترهای موثر بر خروجی لیزر میزان غلظت آلاییدگی است. شکل ۶ توان خروجی را به‌صورت تابعی از غلظت آلاینده نشان می‌دهد. خروجی لیزر نسبت به غلظت آلاینده نیز مقدار بهینه‌ای دارد  $(N_{opt} = 4/4 \times 10^{+25} m^{-3})$ . در غلظت‌های کمتر از  $N_{opt}$ ، تعدادی از فوتون‌های پمپ بدون اینکه باعث تحریک و گسیل القایی شوند در محیط تضعیف می‌گردند و در غلظت‌های بیشتر از  $N_{opt}$ ، تعداد یون‌های  $Yb^{3+}$  از تعداد فوتون‌های پمپ بیشتر است و بعد از جذب کامل فوتون‌های پمپ، فوتون‌های لیزر با یون‌های  $Yb^{3+}$  برهمکنش می‌کنند (زیرا  $\sigma_{ap} > \sigma_{as}$ ) که این پدیده در نهایت منجر به تضعیف سیگنال لیزر و توان خروجی می‌شود. لازم به ذکر است که تغییرات غلظت در محدوده‌ای نزدیک به یک نمونه کار آزمایشگاهی رسم شده‌است که در توانها و غلظت‌های بکار رفته در محاسبات، معادلات (۳-۱) معتبر می‌باشند [۵] و اثرات غیرخطی در معادلات آهنگ برای محدوده توانها و غلظت‌های بکار رفته وارد نمی‌شوند. در واقع استفاده از فیبرهای دوغلافی امکان پمپاژ با توان بالا بدون وارد شدن اثرات غیرخطی را در لیزرهای فیبری امکان‌پذیر می‌سازد، زیرا در فیبرهای دوغلافی به‌دلیل داشتن سطح مقطع بالا، شدت در واحد سطح کاهش یافته که خود باعث کاهش اثرات غیر خطی می‌شود.

شکل ۷ توان خروجی را به‌صورت تابعی از ضریب بازتاب  $R_p$  نشان می‌دهد. توان خروجی به‌طور خطی با ضریب بازتاب واقع در ورودی فیبر افزایش می‌یابد، اما مطابق شکل ۸، خروجی لیزر نسبت به ضریب بازتاب  $R_p$  واقع در خروجی لیزر مقدار بهینه‌ای دارد  $(R_{p,opt} = 0.02)$ . در لیزرهای

شرایط مرزی، معادلات (۴-۵)، از روش تیراندازی<sup>۴</sup> استفاده شده‌است. در محاسبات، تزریق پمپ از ابتدای فیبر در نظر گرفته‌شده و پارامترهای مورد استفاده مطابق با یک نمونه کار آزمایشگاهی است [۵]، پارامترهای بکار رفته به‌صورت زیر می‌باشند مگر اینکه مقدار دیگری ذکر شده باشد:

$$L = 15m, \lambda_p = 975nm, \lambda_s = 1090nm, P_p(z=0) = 100W, \tau = 0.84ms, \sigma_{ap} = 2/5 \times 10^{-24} m^2, P_p(z=L) = 100W, \sigma_{as} = 1/4 \times 10^{-27} m^2, \sigma_{ep} = 2/5 \times 10^{-24} m^2, N = 4 \times 10^{25} m^{-3}, A = 8 \times 10^{-11} m^2, \sigma_{es} = 2 \times 10^{-25} m^2, \Gamma_p = 0.0046, \alpha_s = 5 \times 10^{-7} m^{-1}, \alpha_p = 6 \times 10^{-7} m^{-1}, R_p = 0.04, R_s = 0.98, \Gamma_s = 0.9$$

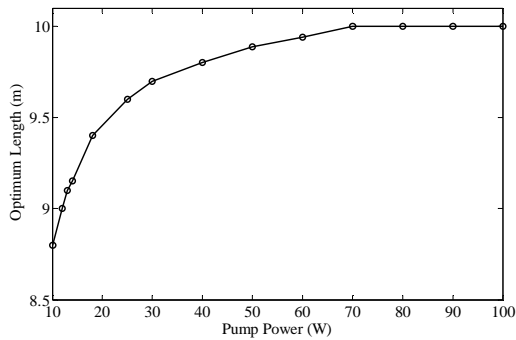
#### ۴- نتایج حاصل از محاسبات

شکل ۲ تغییرات توان‌های پمپ و سیگنال را در لیزری به طول ۱۵ متر در حالت تزریق پمپ از ابتدای فیبر نشان می‌دهد. باریکه‌ی پمپ در طول فیبر تضعیف و سیگنال تولیدی که همسو با پمپ است، تقویت می‌گردد. طولی از فیبر که به‌ازای آن بیشترین توان پمپ به فیبر برسد طول بهینه می‌باشد. در طول‌های کمتر از طول بهینه، برانگیختگی تراز بالا به بیشینه خود نرسیده و در طول‌های بیشتر، تلفات پمپ افزایش می‌یابد. برای بدست آوردن طول بهینه، توان خروجی لیزر را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

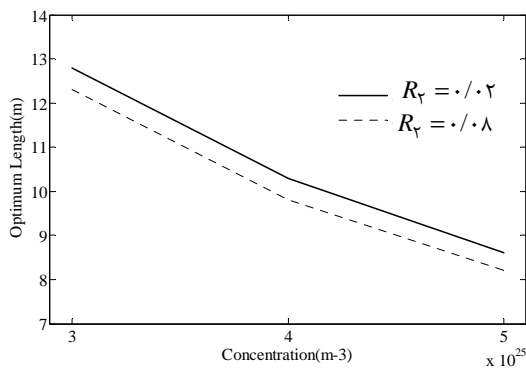
$$P_{out} = P_s^+(L) - P_s^-(L) = (1 - R_p)P_s^+(L) \quad (6)$$

با محاسبه‌ی  $P_{out}$  برای فیبرهایی با طول‌های مختلف طول بهینه حاصل می‌شود. شکل ۳ طول بهینه را برای حالت تزریق پمپ در  $z=0$  نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی توان خروجی در طول  $L_{opt} = 10m$  است. طول بهینه خود نیز تابعی از توان پمپ و غلظت آلاینده می‌باشد. شکل ۴ تغییرات طول بهینه را با توان پمپ تزریق شده در ابتدای فیبر، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش توان پمپاژ طول بهینه تقریباً به طور نمایی افزایش می‌یابد و در توان‌های بالاتر مقدار آن

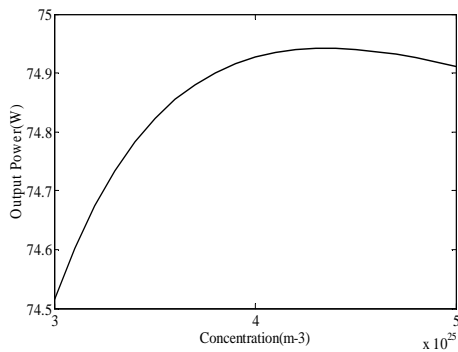
<sup>4</sup> Shooting method



شکل ۴: طول بهینه‌ی لیزر به صورت تابعی از توان پمپ تزریقی در ابتدای فیبر

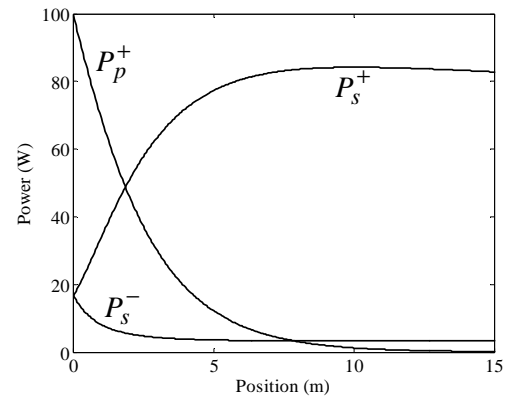


شکل ۵: طول بهینه‌ی لیزر به صورت تابعی از غلظت آلاینده برای دو ضریب بازتاب  $R_p = 0.2, 0.8$

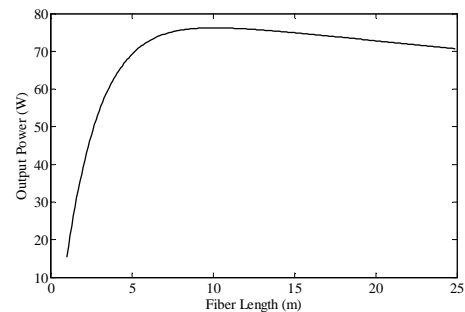


شکل ۶: تغییرات توان خروجی لیزر به صورت تابعی از غلظت آلاینده ( $N_{opt} = 4/4 \times 10^{+25} m^{-3}$ )

فیبری برخلاف سایر لیزرها به دلیل زیاد بودن طول محیط فعال (چندین متر) ضریب بازتاب خروجی مقادیر کوچکی دارد. بازتابنده‌ی  $R_p$  با بازتاب سیگنال لیزر به درون فیبر به تابش القایی در محیط کمک می‌کند. به‌ازای مقادیر کمتر از  $R_{p,opt}$  توان خروجی به دلیل کم بودن توان سیگنال لیزر برگشتی، کاهش می‌یابد و به‌ازای مقادیر بزرگتر از  $R_{p,opt}$ ، بازتاب زیاد سیگنال لیزر به درون فیبر، باعث کاهش توان خروجی می‌شود.



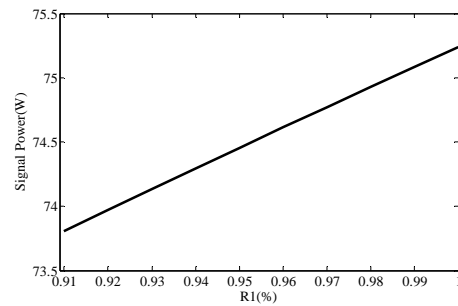
شکل ۲: تغییرات توان پمپ و سیگنال لیزر در طول فیبر



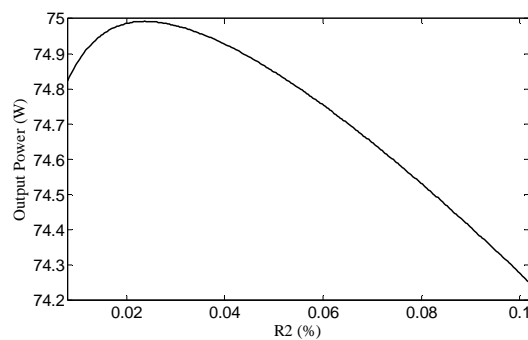
شکل ۳: توان خروجی لیزر به صورت تابعی از طول فیبر ( $L_{opt} = 10 m$ )



- scattering loss”, **Optics Communications**, 230, pp. 401-10, 2004.
- [2] H. M. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber and J. M. Dawes, “*Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1-1.2 μm Region*”, **IEEE Journal of Topics in Quantum Electronics**, 1, pp. 2-13, 1995
- [3] I. Kelson and A. Hardy, “*Strongly pumped fiber lasers*”, **IEEE Journal of Quantum Electronics**, 34, pp. 1570-77, 1998
- [4] G. Liu, D. Liu, “*Optimization of pumping mode for double-clad fiber lasers*”, **Optics & Laser Technology**, 40, pp. 256-60, 2008
- [5] D. Xue, Q. Lou and J. Zhou, “*comparison of Yb-doped fiber laser with one-end and double-end pumping configuration*”, **Optics & Laser Technology**, 39, pp. 871-74, 2007.



شکل ۷: توان خروجی لیزر به صورت تابعی از ضریب بازتاب  $R_1$



شکل ۸: توان خروجی لیزر به صورت تابعی از ضریب بازتاب  $R_2$

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از حل عددی معادلات آهنگ، به بهینه‌سازی لیزر فیبری دوغلافی آلاییده به  $Yb^{+3}$  پرداخته و بدین منظور تاثیر پارامترهای مختلفی همچون توان پمپ، میزان آلاییدگی، طول فیبر و ضرایب بازتابنده‌های براگ بر خروجی لیزر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که طول بهینه‌ی لیزر به توان پمپاژ، غلظت آلاینده و ضرایب بازتاب بستگی دارد، بطوریکه با افزایش توان پمپ، طول بهینه افزایش و با افزایش غلظت آلاینده و ضریب بازتاب  $R_2$  طول بهینه کاهش می‌یابد. طول بهینه در توان پمپاژهای بالا، به مقدار ثابتی می‌رسد و می‌توان با لیزری با طول خاص برای بازه‌ای از پمپاژها استفاده نمود. برای غلظت آلاینده و ضریب بازتاب  $R_2$  نیز مقادیر بهینه‌ای وجود دارد.

## مراجع

- [1] L. Xiao, P. Yan, M. Gong, W. wei and P. Ou, “An approximation analytic solution of strongly pumped Yb-doped double-clad fiber laser without neglecting the