بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی وشبیه سازی لیزر فیبری با پهنای طیفی باریک با استفاده از جاذب اشباع شدنی

نسترن پورشب ، اصغر غلامی ، محمد جواد حکمت، نرگس شهریاری،محمد کنعانی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر،دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده:در این مقاله لیزر فیبری تک فرکانس با پهنای طیفی باریک با اضافه کردن فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده به کاواک حلقه ای، به عنوان جاذب اشباع شدنی معرفی شده است. جاذب اشباع شدنی به عنوان فیلتر باریک کننده عمل میکند. پهنای طیفی لیزرارائه شده $44MHz$ می باشد. توان خروجی لیزر در طول موج $1550nm$ معادل $76mW$ با توان پمپ شده $300mW$ در طول موج $980nm$ می باشد. عملکرد فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده و کاواک حلقه ای به صورت تئوری آنالیز وشبیه سازی شده است.

کلید واژه: تک مد طولی، فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده، کاواک حلقه ای فیبری، لیزر فیبری

Simulation and Properties of Narrow Linewidth Fiber Laser Using a Saturable Absorber

Nastaran Pourshab , Asghar gholami, Mohammad Javad Hekmat,Narges Shahriyari,Mohammad Kanani

Isfahan University of Technology,Isfahan

Abstract:A narrow linewidth single-longitudinal-mode fiber ring laser is demonstrated by incorporating an unpumped Er^{+3} -doped fiber section as saturable absorber. The saturable absorber acts as a narrow bandpass filter. The laser showed single mode operation with a narrow linewidth of $44MHz$. Output powers up to 76mW at 1550nm are obtained for lanched pump powers of 300mW at 980nm. The mode selection mechanisms of the un-pumped EDF and ring resonator are theoretically analyzed and simulated.

Keywords: Fiber laser, Fiber ring cavity, Single-longitudinal-mode , Un-pumped EDF

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

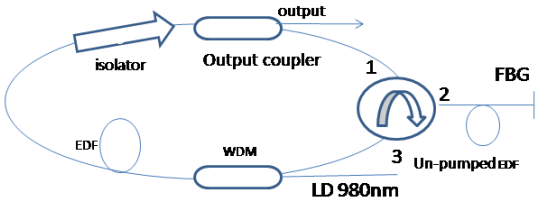
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱-مقدمه

لیزر های تک فرکانس با پهنای طیفی باریک به دلیل کاربردهای گسترده مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند و تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. از جمله کاربردهای این نوع لیزرها می توان به سیستم های ارتباطیDWDM، رادار لیزری همدوس، آنالیز کردن طیف با دقت بالا و انواع سنسورهای نوری اشاره کرد[1]. ساده ترین راه برای کاهش پهنای طیفی، وارد کردن المان های محدود کننده پهنای طیفی درون کاواک می باشد[4]. یک راه مناسب استفاده از توری های براگ می باشد. ولی به دلیل قیمت بالا از نظر اقتصادی به صرفه نمی باشد. در سال های اخیر پیکربندی های مختلفی از نوع کاواک حلقه ای یا خطی برای این نوع لیزرها ارائه شده است. اخیرا پیاده سازی این نوع لیزر به صورت لیزر فابری پرو با طول بسیار کوتاه (در حد سانتی متر)گزارش شده است. مشکلی که در این ساختار به دلیل طول کوتاه کاواک ایجاد می شود، کاهش جذب پمپ و در نتیجه کاهش بازده خروجی می باشد[10]. در یک کاواک با طول کوتاه، برای رسیدن به بهره بالا، لازم است تا جذب نور پمپ شده به مقدار زیادی افزایش یابد. به این منظور لازم است، آلاییدگی با غلظت بالایی انجام شود. غلظت بالای یون های اربیوم (غلظت های بالاتر از $4/4\times10^{19}cm^{-3}$)به دلیل پدیده تبدیل رو به بالا (cooperative upcoversion) باعث کاهش بهره می شود. مشکل دیگر این نوع لیزرها محدودیت کوک پذیری تا حد 5nm می باشد. پیشنهاد دیگر برای پیاده سازی لیزر تک فرکانس به صورت کاواک حلقه ای موج رونده می باشد. از مزایای این روش، بازده بالا و قابلیت کوک پذیری گسترده تا حد 30nm می باشد. به دلیل طول بلند کاواک این نوع لیزرها اصولا پهنای طیفی باریکی دارند، ولی متاسفانه مسئله رقابت مدی ایجاد می شود[10]. تئوری معرفی شده در این مقاله، ایجاد توری مجازی(transient gratings) با اضافه کردن فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده به کاواک حلقه ای موج رونده می باشد که به عنوان فیلتر باریک کننده عمل می کند. در واقع فیلتر باریک کننده توسط اثر اشباع امواج ایستا در اربیوم پمپ نشده ایجاد می شود و به طور موثری مانع ایجاد رقابت مدی و باعث ایجاد پایداری فرکانسی می شود. تشکیل امواج ایستا در فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده باعث می شود این قسمت از سیستم نوری به عنوان جاذب اشباع شدنی عمل کند. امواج ایستای تشکیل شده توزیع شدت متناوبی دارد. توزیع شدت متناوب $I(z)$ منجر به متناوب شدن ضریب جذب $\alpha(z)$ می شود. تغییرات متناوب ضریب جذب طبق رابطه کرامرز-کرینگ باعث تغییرات متناوب ضریب شکست می شود و تغییرات متناوب ضریب شکست باعث تشکیل توری مجازی می شود. بنابراین فیلتر باریک کننده را می توان به عنوان توری گذرا مدل کرد[5,6,3,2] .

۲- شبیه سازی لیزر فیبری با پهنای طیفی باریک

شکل 1 مدل تئوری لیزر فیبری حلقه ای همراه با جاذب اشباع شدنی را نمایش می دهد. عمل پمپ از طریق لیزر دیود در طول موج 980nm انجام می شود. محیط فعال شامل 3m فیبر تک مد با آلایش اربیوم با ماکزیمم جذب 30dB/m در طول موج 1530nm می باشد. نور پمپ شده از طریق WDM 980/1550nm وارد محیط فعال می شود. بعد از محیط فعال، ایزولاتور برای اطمینان از اینکه لیزر فیبری در یک جهت عمل می کند قرار می گیرد. 2m فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده بین پورت ۲ چرخاننده وFBG قرار می گیرد. لیزر خروجی از طریق کوپلر ۵۰/۵۰ به سمت بیرون کاواک هدایت می شود.



شکل 1-پیکربندی لیزر فیبری حلقه ای همراه فیبر اربیوم پمپ نشده

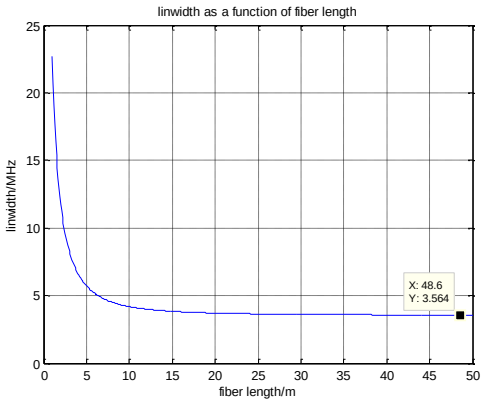
پهنای طیف بازتابی از توری مجازی تشکیل شده در جاذب اشباع شدنی از رابطه (۱) محاسبه می شود[7]:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda}\frac{2\Delta n}{n_{\text{eff}}\lambda}\sqrt{(\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}})^2+(\frac{\lambda}{2n_{\text{eff}}l_s})^2} \qquad (1)$$

c سرعت نور، λ طول موج مرکزی، n_{eff}ضریب شکست موثر، Δn تغییرات ضریب شکست، l_s طول فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده می باشد. عملکرد فیلتر باریک کننده با استفاده از نرم افزار متلب شبیه سازی شده شدت است. مطابق نمودار ۱ با افزایش طول، پهنای طیفی توری

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

کاهش می یابد. افزایش طول فیبر جاذب اشباع شدنی باعث جذب بیشتر و در نتیجه کاهش توان خروجی می شود. همچنین با افزایش طول فیبر، پلاریزاسیون به تغییر می کند. تغییرات پلاریزاسیون اثرات نامطلوبی روی پایداری امواج ایستای تشکیل شده در فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده دارد. کوتاه کردن طول جاذب اشباع شدنی تاثیرات منفی روی پایداری تغییرات ضریب شکست و میزان جذب دارد[11,12]. درواقع عملکرد توری مجازی با انتخاب طول مناسب، بهینه می شود. با توجه به نکات بیان شده وشبیه سازی انجام شده طول فیبر اربیوم پمپ نشده 2 متر انتخاب می شود.



نمودار ۱-پهنای طیفی فیلتر باریک کننده تابعی ازطول فیبربا آلایش اربیوم پمپ نشده

در یک لیزر حلقه ای فاصله بین مدهای طولی از رابطه زیر محاسبه می شود[8]:

$$\Delta f_{\text{cavity}} = \frac{c}{nl_0} \qquad (۲)$$

n ضریب شکست و l_0 طول کاواک حلقه ای می باشد. طول کاواک ۱۰ متر و فاصله بین مدهای طولی 20/6MHz و پهنای طیفی فیلتر باریک کننده طبق رابطه ۱، 11/76MHz می باشد. بنابراین عملکرد تک مد بودن لیزر تضمین می شود. مدل لیزر حلقوی براساس پهن شدگی همگن و با تقریب دو ترازی بودن یون های اربیوم(تراز $I_{11/2}$ بدون جمعیت فرض می شود)به صورت روابط زیر توصیف می شود[9]:

$$\frac{dn_1(z,t)}{dt} = -[w_{\text{sa}}(z) + w_{\text{p}}(z)]n_1(z,t) + [w_{\text{se}} + \frac{1}{\tau}]n_2(z,t) \qquad (۳)$$

$$\frac{dn_2(z,t)}{dt} = [w_{\text{sa}}(z) + w_{\text{p}}(z)]n_1(z,t) - [w_{\text{se}} + \frac{1}{\tau}]n_2(z,t) \qquad (۴)$$

که در آن n_1 جمعیت اتمی تراز پایه ، n_2 جمعیت اتمی تراز برانگیخته ، w_{sa} نرخ جذب، w_{se} نرخ گسیل، w_p نرخ پمپ، و τ، طول عمر گسیل خود به خودی می باشد [9].

$$\frac{dP_{\text{p+}}(z)}{dz} = [n_2\sigma_{\text{ep}}\Gamma_{\text{p}} - n_1\sigma_{\text{ap}}\Gamma_{\text{p}}]P_{\text{p}_+}(z) \qquad (۵)$$

$$\frac{dP_{\text{ase+}}(z,\nu)}{dz} = [n_2\sigma_{\text{e}}\Gamma_{\text{s}} - n_1\sigma_{\text{a}}\Gamma_{\text{s}}]P_{\text{ase+}}(z,\nu) + 2\hbar\nu\Delta\nu n_2\sigma_{\text{e}}\Gamma_{\text{s}} \qquad (۶)$$

$$\frac{dP_{\text{ase-}}(z,\nu)}{dz} = [n_1\sigma_{\text{a}}\Gamma_{\text{s}} - n_2\sigma_{\text{e}}\Gamma_{\text{s}}]P_{\text{ase-}}(z,\nu) - 2\hbar\nu\Delta\nu n_2\sigma_{\text{e}}\Gamma_{\text{s}} \qquad (7)$$

Γ_s ضریب همپوشانی سیگنال و Γ_p ضریب همپوشانی پمپ می باشد. P_{p+} توان پمپ شده، P_{ase+} توان مربوط به گسیل خودبه خودی تقویت شده در جهت ایزولاتور، P_{ase-} توان مربوط به گسیل خودبه خودی تقویت شده خلاف جهت ایزولاتور، σ_a سطح مقطع جذب، σ_e سطح مقطع گسیل، σ_{ep} سطح مقطع گسیل در طول موج پمپ، σ_{ap} سطح مقطع جذب در طول موج پمپ، $\hbar$ ثابت پلانک و $\Delta\nu$ گام فرکانسی می باشد.

شبیه سازی با نرم افزار متلب با روش رانگ-کوتا و روش relaxation به همراه شرایط مرزی مطابق روابط 8و 9 انجام شده است(k شمارنده دور حلقه فیبری).

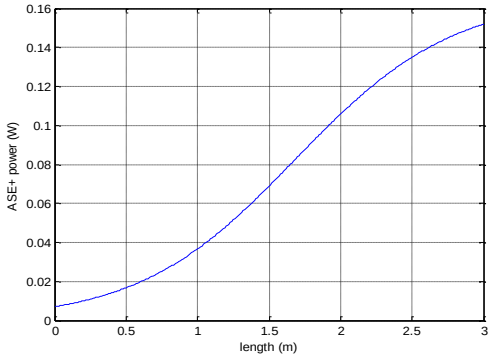
$$P^{\text{k}}_{\text{ase+}}(z=0,\nu) = P^{\text{k-1}}_{\text{ase+}}(z=l,\nu)\alpha_{\text{ring}}R(\nu) \qquad (8)$$

$$P^{\text{k}}_{\text{ase-}}(z=l,\nu) = P^{\text{k-1}}_{\text{ase-}}(z=0,\nu)\alpha_{\text{ring}}\alpha_{\text{isolator}}R(\nu) \qquad (9)$$

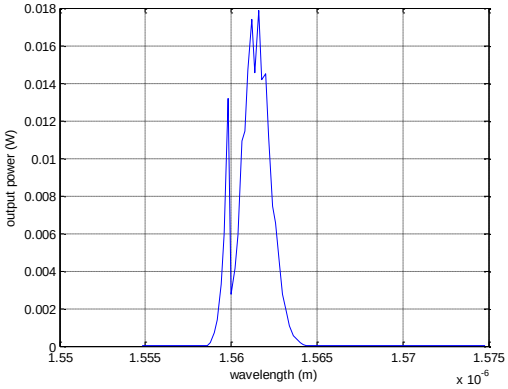
$\alpha_{\text{ring}} = 4dB$ تلفات رزوناتور حلقه ای شامل تلفات کوپلر و سایر المانها و $\alpha_{\text{isolator}} = 30dB$ ضریب ایزولاسیون ایزولاتور می باشد. R(ν) تابع انتقال فیلتر باریک کننده(جاذب اشباع شدنی)می باشد[7]. میزان توان خروجی لیزر با 300mW توان پمپ شده در طول موج 980nm، 76mw در طول موج 1550nm است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

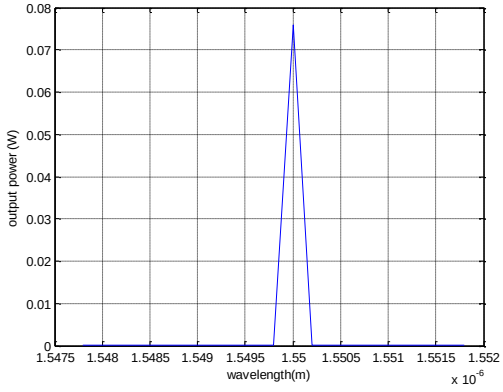
نمودار توزیع توان گسیل خود به خودی تقویت شده در جهت ساعت گرد در طول فیبر و طیف خروجی لیزر بدون در نظر گرفتن فیلتر باریک کننده و با در نظر گرفتن فیلتر باریک کننده به ترتیب مطابق نمودار 2 و 3 و۴ می باشد. مطابق نمودار ۴ و۳ با اضافه کردن جاذب اشباع شدنی لیزر به صورت تک مد عمل می کند و پهنای طیفی کاهش می یابد. پهنای طیفی FWHM لیزر خروجی بدون در نظر گرفتن فیلتر باریک کننده و با در نظر گرفتن فیلتر باریک کننده مطابق نمودار ۳و ۴ به ترتیب 199GHz ، 44MHz می باشد.



نمودار 2- توزیع توان گسیل خود به خودی تقویت شده در جهت ساعت گرد در طول فیبر



نمودار 3-طیف خروجی بدون استفاده از جاذب اشباع شدنی



نمودار 4-طیف خروجی با اضافه کردن جاذب اشباع شدنی

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد لیزر فیبری به صورت کاواک حلقه ای همراه با فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده به عنوان فیلتر باریک کننده بررسی شده است. توان خروجی لیزر 76mW در طول موج 1550nm با 300mW توان پمپ شده در طول موج 980nm و پهنای طیفی FWHM لیزر خروجی بدون در نظر گرفتن فیلتر باریک کننده و با در نظر گرفتن فیلتر باریک کننده به ترتیب 199GHz و 44MHz می باشد.مشخص است فیبر با آلایش اربیوم پمپ نشده به عنوان فیلتر باریک کننده عمل می کند.

مراجع

[1] Dai Z., Zhang X.,Stable high power narrow linewidth single frequency fiber laser using a FBG F-P etalon and a fiber saturable absorber, **IEEE** (2010).

[2] Siegman A.E., *Lasers*, p.321, University Science, 1986.

[3] Horowitz M., Daisy R.,Fischer B., Zyskind J., *Linewidth-narrowing mechanism in lasers by nonlinear wave mixing*, **Opt.Lett.**19 (1994) 1406-1408.

[4] Digonnet J.F., *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and amplifiers*, p.247, Stanford University, 1993.

[5] Horowitz M., Daisy R., Fischer B., Zyskind J., Narrow-linewidth,singlemode erbium-doped fiber laser with intra cavity wave mixing in saturable absorber, **Electron.Lett.**30 (1994) 648-649.

[6] Zhao S., Lu P., Chen Li., Liu D., Zhang J.,*Transient Bragg fiber gratings formed by unpumped thulium doped fiber*,**Optoelectron** (2013) 180-183.

[7] Zhang K., Kang J., C-band wavelength-swept single-longitudinal mode erbium-doped fiber ring laser, **Opt.Express**.16 (2008) 14173-14179.

[8] Zhao J., Zhang C.,Miao C., Gu H., Switchable narrow linewidth single-longitudinal mode erbium fiber laser by using saturable-absorber filter and cavity loss control, **Opt.Communication** (2014) 229-234.

[9] Karasek M., Bellemare A., Numerical analysis of multifrequency erbium-doped fiber ring laser employing periodic filter and frequency shifter, **Optoelectron**.147 (2000) 115-119.

[10] Cheng Y., Kringlebotn J.T., Loh W.H., Laming R.I., Payne D.N., Stable single-frequency travelling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter, **Opt.Lett**.20 (1995) 875-877.

[11] Sun T., Gou Y., Huo J., Hu D.,Stable single-longitudinal mode fiber ring laser based on polarization maintaining erbium doped fiber,**Elsevier** (2014) 2487-2490.

[12] Meng Z., Stewart G., Whitenett G.,Stable single-mode operation of a narrow-linewidth,linearly polarized,erbium-fiber ring laser using a saturable absorber , **Lightwave Technology**.24 (2006) 2179-2183.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]