

شبیه‌سازی طیف تابش خود به خودی - تقویت شده و مقایسه آن در الیاف‌های دو غلافی مختلف آلاینده شده به ایتربیم

محمد رضا عبدالحسینی مقدم^{۱*}، سیدرضا زارع کلاته^۲، شریفه شاهی^۳

۱- استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی تهران ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان،

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان (خوراسگان)

(دریافت: ۹۵/۰۶/۱۴، پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۲)

چکیده

در این مقاله مدل موج رونده چند طول موجی به همراه معادلات نرخ، برای شبیه‌سازی طیف گسیل خودبه‌خودی تقویت شده در محیط بهره ایتربیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل نشان می‌دهد که با حل معادلات نرخ در حوزه زمان و گستره طول موجی $0.9 - 1.1 \mu\text{m}$ چگونه پیکربندی تقویت کننده و طول آن می‌تواند بر روی عملکرد تقویت کننده اثر گذاشته و مکان قله و پهنای باند را در آن تغییر دهد. همچنین اثر پارامترهای مختلف از جمله نسبت مساحت هسته به مساحت غلاف داخلی الیاف، غلظت آلاینده، طول موج دمش و پیکربندی آن، بر روی طیف ASE مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مقادیر ثابت از توان، طول موج دمش، مساحت هسته به غلاف داخلی و غلظت، با افزایش طول محیط بهره از ۱۰ تا ۴۰۰ cm مکان قله غالب در طیف ASE از ۱۰۵۵/۴۲ nm به ۱۰۷۴ nm منتقل می‌شود. ضمن اینکه پهنای مشاهده شده در طیف ASE از ۴۸ نانومتر به ۳۳ nm کاهش می‌یابد. در طول ثابتی از الیاف اگر طول موج دمش به اندازه کافی افزایش یابد پهنای باند ASE حتی تا ۱۵ nm کاهش می‌یابد. این نتایج با گزارش‌های تجربی این گروه، تأیید می‌شود. در مجموع ثابت می‌شود که از طریق طول الیاف، نحوه دمش و طول موج آن، طیف بهره قابل مهندسی است و می‌توان یک طیف تقریباً پهن، متقارن و کم تغییر و یا بر عکس یک طیف بهره باریک با بهره بزرگ را شکل داد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، ASE، مدل موج رونده، الیاف ایتربیم دو غلافی

Simulation and Comparison of Amplified Spontaneous Emission Spectrum in Various Ytterbium Doped Double-Clad Fibers

M. A. Moghaddam*, S. R. Zare Kalate, S. Shahi

Photonics and Quantum Technologies Research School, NSTRI, Tehran

(Received: 04/09/2016; Accepted: 02/03/2017)

Abstract

In this article, the multi-wavelength traveling wave model with rate equations are utilized to simulate the ASE spectrum in ytterbium-doped gain media. By solving the rate equations in time domain and in 0.9-1.1 μm region, the model shows how the fiber length and amplifier configuration can affect amplifier operation and change the peak gain or bandwidth. The effect of various parameters including ratio of core area over inner cladding area, doping profile, pump wavelength and pumping scheme on the ASE spectrum are investigated. For a given pump power, wavelength, core over cladding area ratio and fiber concentration, by increasing the YDF length from 10 to 400 cm, the dominant peak in ASE spectrum, shifts from 1055.42 to 1074 nm. Meanwhile the FWHM of the observed spectra decreases from 48 nm to 33 nm. For a given fiber length and by a sufficient increase of the pumping wavelength, we can further decrease the ASE (fluorescence) bandwidth by about 15 nm. These new results are consistent with those obtained from our experiments. In conclusion, by adjusting the fiber length, the pumping scheme and the wavelength, one can either form a nearly broad, symmetric and smooth or a narrow high gain spectrum.

Keywords: Simulation, ASE, Traveling Wave Model, Ytterbium Doped Double-Clad Fibers

* Corresponding Author E-mail: mrammoghaddam@gmail.com

۱. مقدمه

الیاف‌های نوری به دلیل خواص مناسب، یکی از کاربردی‌ترین محیط‌های بهره‌لیزری هستند. لیزرهای الیافی با داشتن مزیت‌هایی چون، نیاز به حداقل تنظیمات مکانیکی، میزان بالای آرایش و اتلاف پایین، دارای کاربردهای وسیعی در صنایع نظامی، مخابرات نوری، صنعتی و پزشکی شده‌اند. از میان مشخصه‌های مهم برای یک لیزر یا تقویت‌کننده نوری، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

۱- طیف گسلی (یا تنظیم پذیری) ۲- پهنای خط (یا پایداری سیگنال خروجی) ۳- اندازه گسیل خود به خودی تقویت شده (یا نسبت فرونشانی مدهای جانبی^۱ SMSR) ۴- مد کارکرد زمانی (یا پهنای باند) و ۵- انرژی (یا توان متوسط خروجی). در محیط بهره‌لیزری برخی از یون‌های فعال لیزری بعد از برانگیخته شدن نوری، به طور خود به خودی گسیل نوری خواهند داشت که بخشی از نور (فلورسانس) تولیدی از کناره‌های الیاف خارج می‌شود، با این حال قسمت کمی از آن در امتداد الیاف منتشر و سپس تقویت می‌شوند که این پدیده منجر به گسیل خود به خودی تقویت شده (یا ASE) می‌شود. برای طول موج‌هایی با بهره بزرگ‌تر از ۳۰ dB این ASE می‌تواند بخش قابل توجهی از توان اپتیکی را تخلیه کند و (در فرایندی مشابه با گسیل) باعث اشباع بهره شود. به همین دلیل رسیدن به بهره بالای ۴۰ dB حتی با دمش قوی دشوار خواهد بود [۱]. در این شرایط پالایش ASE اجتناب‌ناپذیر است. برای بررسی پارامترهای مؤثر در کارکرد کلیدزنی-Q غیر فعال (ناکنا) نیز، همواره قبل از برپایی چینش اپتیکی، رفتار سامانه بدون جاذب اشباع‌پذیر و آینه‌ها، از طریق شبیه‌سازی ASE، باید مورد ارزیابی قرار گیرد تا میزان تابش برانگیخته مثلاً در دیرش زمانی، یا سهم توانی آن در طیف خروجی مشخص گردد. این مسئله وقتی دوره زمانی تپ از طول عمر تراز بالایی لیزری فراتر رود با اهمیت‌تر خواهد شد. در این حالت اگر چه بهره دریافتی هر تپ بیشتر می‌شود ولی گسیل‌های خود به خودی در فاصله زمانی بین دو تپ در همه جهات گسترش و تقویت می‌شود که باعث کاهش وارونی جمعیت، محدودسازی در بهره گسیل کم دامنه و کاهش انرژی قابل استخراج می‌گردد [۲].

در تقویت‌سازی تک مرحله‌ای با دمش قوی نیز، بیش از آنکه سهم تقویت‌سازی بر روی تپ مورد نظر صورت گیرد بر روی ASE صورت خواهد گرفت و چون این مشکل برای تقویت‌سازی تپ‌های کوتاه‌تر با نرخ تکرار پایین‌تر، جدی‌تر خواهد بود، باید سعی شود در طبقات تقویت، میزان ASE یا مشخصه SNR (یا در خروجی نوسانگر، نسبت SMSR) بیشتر کنترل شود. دوباره هر

گونه پالایش نویز (مثلاً با اتلاف بیشتر توسط جاذب‌های اشباع‌پذیر)، منوط به دانستن مشخصه طیف همراه شده با تپ خواهد بود. به طور کلی، تنها بر مبنای اطلاعات طیفی (از اتلاف الیاف اپتیکی و بهره اپتیکی)، می‌توان ساختار مناسب را برای یک تشدیدگر یا تقویت‌کننده (برای هر دو رژیم کاری پیوسته یا تپی) انتخاب نمود.

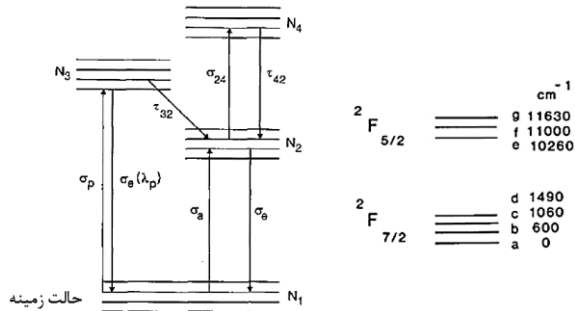
به همین ترتیب بستگی پهنای طیف ASE (یا مکان قله) آن به توان دمش، همچنین تأثیرپذیری آن‌ها از مشخصات الیاف (نظیر نسبت قطر به غلاف، میزان آرایش و اتلاف در الیاف) باید مد نظر قرار گیرد. این بررسی از دیدگاه دیگری نیز ضروری است زیرا در هر یک از موارد تقویت (پیش تقویت‌کننده، تقویت‌کننده میانی یا بوستر)، ممکن است بهره تقویت، کاهش نویز و یا افزایش پهنای باند (هر یک بنا به شرایط)، از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. برای مثال پیش تقویت‌کننده‌ها باید به ورودی حساس تا در آن‌ها بهره تقویت بالا و حداقل نویز تولید گردد، در این حالت روش دمش یا باند دمش، پیشرو یا پسرو بودن آن، نوع طیف فلورسانس یا طول موج بهینه، در آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای را دارا است. در حالی که یک تقویت‌کننده میانی، باید پهن (یا تخت) باند و دارای حداقل نویز باشد. در این حالت دقت لازم باید صورت گیرد که طیف بهره چند قله‌ای نباشد و طول موج‌های دمشی انتخاب شوند که با آن‌ها نویز در تقویت افزایش نیابد. به همین خاطر طول موج دمش باید بر اساس سطح مقطع، طول الیاف و نوع آرایش تقویت‌کننده مشخص شود. برای آریتم باند دمشی ۹۸۰ nm، نویز کمتری را در سیگنال خروجی تولید می‌کند ولی این باند دمش برای ایتربیم، نتایج متفاوتی را در طول موج‌های مختلف لیزری از خود نشان خواهد داد. همواره باید مراقب بود تا دمش، ASE را در باند قوی (جذبی و گسیلی)، شکل ندهد زیرا در غیر این صورت بهره سیگنال کاهش می‌یابد. حذف ASE یا نویز برگشتی، حتی می‌تواند موجب بالا رفتن بهره در طبقه قبلی تقویت‌کننده شود. تنها با بهینه‌سازی میزان ASE و طیف خروجی (بر اساس توان ورودی و طول الیاف) می‌توان ساختار مناسب یک تشدیدگر یا تقویت‌کننده را برای کارکرد پیوسته یا تپی تعیین نمود.

در این مقاله به‌کارگیری روش موج رونده^۲ [۳]، اعمال شرایط اولیه یا مرزی مناسب (برای حالات مختلف دمش یا وارونی جمعیت) معادلات نرخ حل شده و طیف خروجی ASE در الیاف‌های دوغلافی در بازه ۱۱۰۰-۱۰۳۰ nm (برای رژیم‌های مختلف کاری) به کمک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی خواهد شد. بررسی زمانی برای رژیم کاری پیوسته نشان می‌دهد

² Traveling Wave Model

¹ Side Mode Suppression Ratio

تراز اشتراک a، b، c، d و تراز نیمه پایدار یا برانگیخته $2F_{5/2}$ به سه زیر تراز e، f، g تقسیم می‌شوند که تقریباً 10000 cm^{-1} از یکدیگر فاصله دارند.



شکل ۱. ساختار تراز انرژی Yb^{3+} در الیاف‌های سیلیکا پایه [۱۱]

نمادهای $2F_{5/2}$ و $2F_{7/2}$ معادل نماد کوانتومی L_j^{2s+1} است که z، s و L به ترتیب، اعداد کوانتومی اندازه حرکت زاویه‌ای کل، اسپینی و مداری می‌باشند. این ترازها، ترازهایی تسهنگ هستند که درجه‌ی واگنی آن‌ها $(2j+1)$ است و تعداد زیرترازهای وابسته از رابطه $\frac{1}{2}(2j+1)$ به دست می‌آید.

سطح مقطع‌های نشان داده شده در شکل (۲)، ناشی از گذارهایی بین همین زیرترازها است. این ساختار انرژی در میزبان‌هایی چون سیلیکا، حتی مانع فروافت غیر تابشی از طریق گسیل چند فوتونی^۱ از تراز $2F_{5/2}$ به تراز زمینه می‌شود. بر طبق توزیع بولتزمن و بر اساس تابع پارش اگر میزان شکافتگی زیرترازها، در حد انرژی میانگین گرمایی KT باشد، زیرترازها را می‌توان با یکدیگر معادل فرض کرد و سطح مقطع‌های جذب و گسیل را تقریباً یکسان در نظر گرفت. در مورد عنصر Yb، میزان شکافتگی زیرترازها (حدود 500 cm^{-1}) از انرژی میانگین KT (حدود 200 cm^{-1}) بزرگ‌تر است. در این حالت، رابطه میان سطح مقطع‌ها، طبق نظریه مک‌کامبر $\sigma_{21}(v) = \sigma_{12}(v)e^{(\epsilon-hv)/KT}$ که در آن ϵ میانگین انرژی بین زیرترازها و شامل تابع پارش است. بر اساس نظریه مک‌کامبر تنها در طول موج ۹۷۵ nm به رابطه انیشتین $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ می‌رسیم. همان‌طور که شکل (۲) نشان می‌دهد در طول موج‌های دیگر با افزایش σ_{es} ، سطح مقطع σ_{as} کاهش می‌یابد و همواره تغییرات سطح مقطع‌های جذب و گسیل در خلاف جهت یکدیگر است. شکل زیر نشان می‌دهد که طیف جذب، دارای دو باند مؤثر ۹۱۵ nm و ۹۷۵ nm است. قله جذب در (حوالی ۹۱۵ nm) ناحیه B، از گذارهایی از تراز a به ترازهای f و g به دست می‌آید. در حالی که برای ناحیه طول موجی ۹۷۵ nm، پهنای خط چشمه دمش، باید کوچک نگاه داشته شود.

که مدت $70\mu s$ کافی است که رشد گسیل خود به خودی تقویت شده به مقدار ثابت خود سوق پیدا کند. نتایج شبیه‌سازی و رسم سه بعدی تابش خود به خودی تقویت شده، در مدت زمان شکل‌گیری یا در حضور تپ همچنین می‌تواند برای تولید تپ‌های لیزری به روش ناگنا [۴] و یا برای تقویت آن‌ها مفید باشد. مقادیر ارائه شده از مکان قله ASE توافق خوبی با کارهای تجربی قبلی این گروه دارد [۹-۱۵]. در بازه ۱۲۰۰-۱۰۰۰ nm که در آن رفتار لیزر شبه چهار تراز است، طول موج پر بازده یا پر بهره و طول موج مرکزی FBG، از روی مکان قله ASE در چینش مورد نظر قابل تعیین است. برای کارکرد در دیگر بازه‌ها، بهره را نمی‌توان تنها با ASE مرتبط دانست.

در ادامه (با در نظر گرفتن رابطه غلظت با قطر هسته) تغییرات در ضرایب همپوشانی و توزیع توانی ASE، برای مقادیر مختلف از قطر هسته به پوشش و غلظت، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین اثر طول الیاف، طول موج دمش، قطر الیاف بر روی مکان و نسبت شدت دو قله موجود در طیف ASE مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. این مهندسی طیفی در تشکیل تپ‌های فوق کوتاه و حتی هنگام کلیدزنی ناگنا مفید است.

۲. الگوی محاسباتی و شبیه‌سازی

الیاف‌هایی فعال با آلاینده‌ی فلزات خاکی نادر در میزبان سیلیکایی، آستانه تخریب نوری بالایی دارند [۱۰]. طیف پهن جذبی، یون ایتربیوم Yb^{3+} در سیلیکا (ناشی از گذار $2F_{7/2} \rightarrow 2F_{5/2}$)، امکان به‌کارگیری بسیاری از چشمه‌های لیزری مثلاً دیودی یا حتی با طول موج‌های ۱۰۶۴ nm، ۱۰۴۷ و تیتانیوم یاقوت را فراهم می‌سازد. YDFL در طول موج‌های لیزری پایین تراز ۹۹۰ nm به عنوان یک سامانه واقعی ۳ تراز، بین ۱۰۰۰ nm تا ۹۹۰ nm شبه ۳ تراز، بالای این ناحیه به عنوان دستگاهی شبه ۴ تراز و در ۱۰۶۰ nm و طول موج‌های بالاتر به عنوان یک سامانه کامل چهار تراز رفتار می‌کند. ساختار تراز انرژی در این محیط بهره ساده [۱] و ترازهای اصلی آن عبارتند از: تراز پایه با جمعیت N_1 ، تراز نیمه پایدار با جمعیت N_2 ، و تراز بالایی با جمعیت N_3 . فروافت سریع از تراز (۳) به تراز (۲)، سبب می‌شود تا $N_3 \approx 0$ گردد (شکل (۱)). گاف بزرگ انرژی، مقدار $\sigma_{24} \approx 0$ و ساختار الکترونی ساده، مانع از ایجاد فرآیندهای: ۱- جذب تراز برانگیخته در طول موج‌های دمش و سیگنال، ۲- القای واهلش چند فوتونی و ۳- اثر غیر خطی فروکش چگالی می‌شود. شکل (۱) ساختار تراز انرژی Yb^{3+} را نشان می‌دهد که در آن (به دلیل اثر کوانتومی اشتراک ناشی از میدان الکتریکی ماده میزبان)، تراز پایه $2F_{7/2}$ به چهار

^۱ Multi-Phonon Non-Radiative Decay

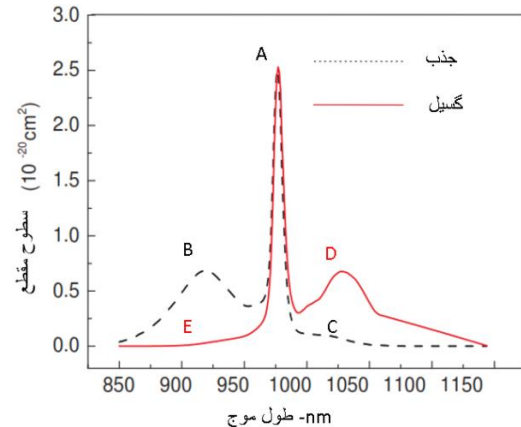
$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_2(x, t)}{\partial t} \\ &= \Gamma_p \lambda_p / hc A_{co} [\sigma_{ap} N_1(x, t) \\ & - \sigma_{ep} N_2(x, t)] P_p^-(x, t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_k \Gamma_k \lambda_k / hc A_{co} [\sigma_{ak} N_1(x, t) - \sigma_{ek} N_2(x, t)] \\ & \times (P_k^+(x, t) + P_k^-(x, t)) - N_2(x, t) / \tau \\ & \pm \frac{\partial P_p^\pm(x, t)}{\partial x} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(x, t)}{\partial t} \\ & = \Gamma_p [\sigma_{ep} N_2(x, t) \\ & - \sigma_{ap} N_1(x, t)] P_p^\pm(x, t) \\ & - \alpha_p \cdot P_p^\pm(x, t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \pm \frac{\partial P_k^\pm(x, t)}{\partial x} + \frac{1}{v_k} \frac{\partial P_k^\pm(x, t)}{\partial t} \\ & = \Gamma_k [\sigma_{ek} N_2(x, t) \\ & - \sigma_{ak} N_1(x, t)] P_k^\pm(x, t) \\ & - \alpha_k \cdot P_k^\pm(x, t) + N_2(x, t) \xi_k \end{aligned} \quad (4)$$

در این دسته از معادلات که جذب و گسیل القایی، گسیل خود به خودی (تقویت شده) در نواحی طول موجی سیگنال و جذب در نظر گرفته شده است، اثرات غیر خطی مورد مشاهده در الیاف های آلانید با غلظت های بالا (نظیر برهمکنش دوقطبی-دوقطبی، اثر خوشه ای شدن و خاموشی چگالی) نادیده گرفته شده است. با توجه به نوع و طول الیاف فعال، همچنین قطر آن و عدم بازخورد توانی (قوی در چینش باز)، از پس پراکنی ریلی و پراکنندگی بریلوئن به علت ناچیز بودن اثرشان، چشم پوشی شده است. به کمک نرم افزار متلب، استفاده از روش موج رونده^۱ و اعمال شرایط مرزی مناسب، معادلات نرخ برای (توصیف فرایند شکل گیری تپ یا) بررسی تحول زمانی گسیل ASE حل می شود. روش موج رونده، روشی متداول برای تبدیل معادلات مشتق جزئی است [۱۶-۲۳]. فرض بر آن است که تمام یون ها در الیاف دارای سطح مقطع های گسیل و جذب یکسان هستند. در این معادلات، N_1 و N_2 به ترتیب چگالی های حالت پایه و برانگیخته، N_0 غلظت کلی یون Yb^{3+} در محیط بهره، P_p^\pm نمایانگر انتشار پیش رو و پس رو توان دمش و P_k^\pm مربوط به انتشار پیش رو و پس رو پرتوی لیزر است. نمایه مربوط به طول موج های گسیلی که به صورت هم زمان می تواند انتشار یابد با k مشخص شده است. سطح مقطع های جذب و گسیل Yb^{3+} در طول موج دمش و گسیل، نیز در معادلات نرخ به صورت σ_{ek} و σ_{ak} ، σ_{ep} ، σ_{ap} نمایش داده شده اند. در این معادلات $\lambda_{p(k)}$ به ترتیب طول

در این نوار میزان برانگیزش ناچیز است با این حال عیوب کوانتومی کمتر از نوار دمش ۹۱۵ nm است که آن را برای جذب کامل توان دمش با طول های کوچک تر با بازدهی بالاتر و اثرات گرمایی کاهش یافته مناسب می سازد. این باند دمشی مناسب برای لیزر های تک فرکانسی است.



شکل ۲. سطح مقطع های جذب و گسیل یون Yb^{3+} در ماده میزبان سیلیکات ژرمانیوم (شرکت سازنده LIEKKI)

پس از برانگیزش با فرآیند مورد اشاره، جمعیت های تراز های f و g به سرعت به تراز e فروافت می کنند. تحریک های مجدد و بازبرانگیختگی ها از تراز e به تراز های b ، c و d قله گسیل در طول موج ۱۰۳۰ nm (ناحیه D) را ایجاد می کنند که دنباله آن تا طول موج ۱۲۰۰ nm ادامه می یابد. به همین دلیل از لیزر های Nd:YLF و Nd:YAG به عنوان چشمه دمش نیز می توان استفاده کرد. در گستره ۹۷۰-۱۲۰۰ nm هر چه طول موج دمش به طول موج لیزر نزدیک تر شود، گسیل فلئوئورسانس با بازده تبدیل بزرگ تری انجام خواهد پذیرفت. ناحیه طول موجی بالاتر از ۱۰۰۰ nm در طیف جذب با ناحیه C نمایش داده می شود. جذب در این ناحیه ناشی از گذارهایی از تراز b به زیرترازهای f ، e و g است. از آنجایی که در دمای اتاق طبق آمار بولتزمن جمعیت تراز b حدود ۶٪ جمعیت تراز a است، سطوح مقطع در نقطه C نسبت به مقادیر آن ها در نقاط A و B کوچک تر هستند. از آنجایی که طول موج هایی که در مکان C قرار گرفته اند، نقش مهم و به سزایی را ایفا می کنند، برای الیاف های دوغلافی، در این ناحیه از آرایش های طولی استفاده می شود، تا بتوان بیشترین بهره خالص در این محدوده تولید گردد. در عمل نوسان لیزری در ناحیه E مشاهده نمی شود زیرا جمعیت گرمایی گذارهایی که از تراز f به تراز های a تا d صورت می گیرد، بسیار کم است. برای شبیه سازی بر پایه معادلات نرخ، از روش های مختلفی می توان استفاده کرد، در این مقاله معادلات نرخ جفت شده زیر به کار گرفته شده است [۱۲-۱۵]:

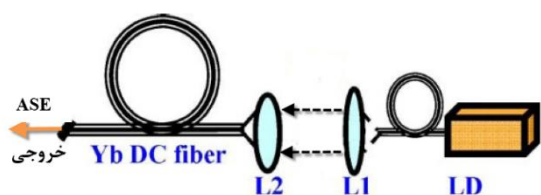
$$N_0 = N_1(t) + N_2(t) \quad (1)$$

^۱ Traveling Wave Model

ساختار اپتیکی زیر برای شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود که در آن از یک لیزر دیود پیوسته (تزیوج شده به الیاف)، چند عدسی برای تمرکز و باز کردن پرتوهای لیزری، الیاف دو غلافی DC-YDF و یک بازتابش فرنل ۴٪ در انتهای الیاف استفاده شده است.

۳. مشخصات و ساختار سامانه مورد استفاده در شبیه‌سازی ASE

چینش مورد استفاده در شبیه‌سازی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. ساختار مورد استفاده در شبیه‌سازی ASE

برای حل معادلات نرخ، توان دمش $P_p^\pm(L, t) = P_0$ طول الیاف L ، گام‌های مکانی $dx = L/200$ ، $dt = dx/(nc)$ ، گام‌های زمانی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین اتلاف تک عبور (به خاطر بازتاب سطوح و جفت شدگی) $\eta \sim 15\%$ فرض شده است. همچنین در بررسی‌های طیفی، ۳۶ طول موج با فاصله $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$ بازه $1100 \text{ nm} - 1030 \text{ nm}$ ، در نظر گرفته خواهد شد. مقادیر مورد استفاده برای شبیه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است (مگر پارامترهایی که تغییرات آن مورد بررسی قرار گرفته است و در شکل مشخص شده است).

جدول ۱. مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی ASE

۹۷۶ nm	طول موج دمش (λ_p)
۳۶	تعداد طول موج‌ها طیف ASE
$2.44 \times 10^{-24} \text{ m}^{-2}$	سطح مقطع گسیل دمش (σ_{ep})
$2.4 \times 10^{-24} \text{ m}^{-2}$	سطح مقطع جذب دمش (σ_{ap})
۱,۴۵	ضریب شکست الیاف (n_f)
۵,۴ μm	قطر الیاف (d_{core})
۱۲۵ μm	قطر پوشش (d_{clad})
$9 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}$	میزان آلایندگی الیاف (N_0)
۳,۵m	طول الیاف L
۰/۸۴ms	طول عمر گذار خودبخودی T_{sp}
پیش‌رو	نوع دمش
۰,۴۸	دهانه عددی - غلاف الیاف (NA)
۰,۱۵	دهانه عددی - هسته الیاف (NA)

موج و سرعت‌های گروه دمش (گسیل) در خلأ هستند. سرعت‌های گروه برای دمش و گسیل با مقدار c/n محاسبه می‌شوند که در آن C سرعت نور در خلأ و n ضریب شکست الیاف است. همچنین h ثابت پلانک، τ طول عمر حالت برانگیخته یون Yb^{3+} و $\alpha_{p(k)}$ اتلاف الیاف در طول موج دمش (گسیل) است. عبارت $N_2(x, t)\xi_k$ در رابطه (۴) مربوط به گسیل خود به خودی در هسته الیاف است که در آن $\xi_k = M\Gamma_k\sigma_{ek}\frac{hc^2}{\lambda_k^3}\Delta\lambda_k$ برای تعداد M مد عرضی و پهنای باند گسیل خود به خودی $\Delta\lambda_k$ دارای واحد Wm^2 است. در الیاف‌های تک غلافی، نور دمش مستقیم به داخل هسته کوچک الیاف تزریق می‌شود و توان چشمه دمش، توسط حد پراش محدود می‌گردد. برای رفع محدودیت در توان دمش تزریقی، می‌بایست زاویه پذیرش الیاف و در پی آن قطر الیاف افزایش یابد. این به معنای چند مدی شدن الیاف و کاهش کیفیت باریکه خروجی و از طرف دیگر استفاده از یک الیاف دوغلافی [۲۴] است که از دو موج بر هم مرکز تشکیل شده باشد. در این الیاف‌ها موج بر داخلی برای پرتو گسیل و غلاف داخلی برای عبور نور دمش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب روزنه عددی بزرگی برای دمش، فراهم می‌شود. در این طراحی نور دمش (با واگرایی بزرگ) مستقیماً به داخل هسته الیاف جفت نمی‌شود بلکه به یک ترکیب کننده^۱ وارد شده و خروجی آن روی غلاف داخلی، تزریق می‌شود. وقتی نور چند مدی دمش به زیر غلاف می‌رسد، با هسته آلاییده تک مد داخلی، همپوشانی فضایی کرده و کسری از آن توسط ماده آلاییده جذب می‌شود. در معادلات فوق عامل‌های همپوشانی دمش [۲۵] که بیانگر نرخ جذب دمش از غلاف به هسته است $\Gamma_{p(k)}$ با فرض گاوسی بودن شکل موج گسیلی عبارت است از [۲۶]:

$$\Gamma_p = \frac{d_{\text{core}}^2}{d_{\text{clad}}^2} \quad (5)$$

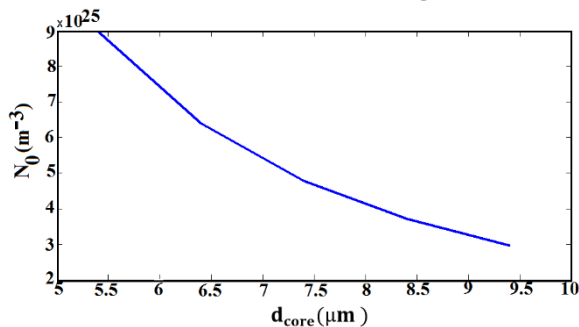
$$\Gamma_k = 1 - \exp\left(\frac{-2A_{\text{eff}}^2}{\pi\omega^2}\right) = 1 - \exp\left(\frac{-2d_{\text{core}}^2}{4\omega^2}\right) \quad (6)$$

که در آن، d_{clad} و d_{core} قطرهای هسته و غلاف هستند. در الیاف‌های تک غلافی، Γ_p تقریباً برابر با Γ_k است ولی در الیاف‌های دوغلافی $1 < \Gamma_k \ll \Gamma_p$ است. در اینجا به دلیل تک مد فرض شدن هسته الیاف، از پایین‌ترین مرتبه مد (یعنی مد LP_{01}) در ضریب بردشدگی استفاده می‌شود و فرض کنید که این ضریب برای این مد و برای گسیل خود به خودی تقویت شده، در محدوده طیفی، مورد بررسی مستقل از طول موج باشد.

^۱ Combiner

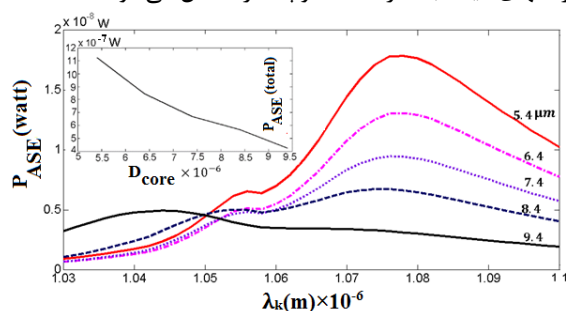
۴. نتایج شبیه‌سازی

غلظت در یک قطر معین از هسته، غلظت آلاینده‌گی در سایر الیاف‌ها به دست می‌آید (شکل ۵)).



شکل ۵. نمودار غلظت-شعاع هسته، برای الیاف‌های LIEKKI 1200

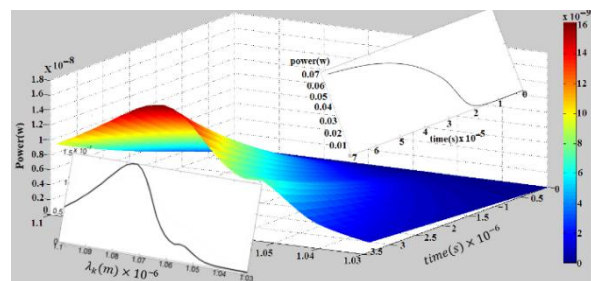
بنابراین قطر هسته به صورت مستقیم در میزان آلاینده‌گی، در ضریب‌های همپوشانی دمش و سیگنال همچنین از طریق سطح مقطع الیاف، در معادلات نرخ تأثیر دارد. در یک طرح لیزری برای افزایش میانگین توان لیزر معمولاً اندازه هسته را بزرگ انتخاب کرده و آن را به شدت می‌دمند. البته سایز دهانه (و در اصل توان خروجی) توسط محدودیت‌های ساختاری و اتلاف‌های ASE و شکست گرمایی محدود می‌شود. برای توان دمش پس‌رو یکسان، خروجی ASE برای قطرهای هسته مختلف در شکل (۶) با یکدیگر مقایسه شده است. البته تغییر مکان قله ASE رفتار متفاوتی را بسته به روش اندازه‌گیری آن در الیاف از خود نشان خواهد داد. برای مثال قله ۹۸۰ تا ۹۹۰ nm از سطح جانبی الیاف مشهودتر و قوی‌تر است. در شکل مشاهده می‌شود که (برای مقدار مشخص از جذب در واحد طول الیاف) با افزایش قطر هسته مکان قله اصلی ASE خروجی، به سمت طول موج‌های کوچک‌تر سوق پیدا می‌کند. برای طول موج دمش ۹۷۵ nm، بیشترین توان ASE در انتهای الیاف با قطر هسته کوچک‌تر حاصل می‌شود.



شکل ۶. تغییر شدت نسبی در طیف ASE برای قطرهای هسته مختلف، شکل داخلی توان ASE خروجی از الیاف در دمش پیش‌رو

برای سهولت در جفت‌شدگی دمش با چشمه‌های پرتوان چند مدی دیدی، مساحت غلاف داخلی در الیاف‌های دوغلافی تا چند صد برابر بزرگ‌تر از مساحت هسته انتخاب می‌شود. این کار منجر به کوچک شدن کسر همپوشانی فضایی، کاهش توان دمش جذب شده در واحد طول و نیاز به طول‌هایی تا ده برابر بزرگ‌تر (از الیاف‌های تک غلافی) می‌شود. این افزایش طول به طراحی سطح

در این بخش به منظور بهینه‌سازی مشخصات لیزر و به دست آوردن اطلاعات مفید در مورد ASE، توان و طیف گسیل خود به خودی تقویت شده را برای غلظت‌های آلاینده مختلف، طول‌های متفاوت الیاف، قطرهای هسته و پوشش مختلف، توان و طول موج‌های دمش گوناگون بررسی خواهد شد. در شکل (۴)، شبیه‌سازی طیف خروجی گسیل خود به خودی در بازه ۱۱۰۰ nm - ۱۰۳۰ nm نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل پیدا است قله گسیل خود به خودی YDF به طول ۳/۵ m و نسبت قطر هسته به غلاف ۵,۴/۱۲۵ در طول موج ۱۰۷۶ nm قرار دارد. این طول موج به دلیل بهره بالای خود، می‌تواند به عنوان طول موج آینه‌ها یا طول موج پر بازده لیزری در نظر گرفته شود. در طول موج‌هایی که YDF به صورت سه تراز می‌کند این اصل قابل به کارگیری نیست زیرا توان ASE تولیدی در این حالت، مانند سامانه‌های چهار تراز مستقیماً به بهره مرتبط نمی‌شود. در واقع گسیل خود به خودی فقط به سطح مقطع گسیل بستگی دارد ولی بهره به سطح مقطع جذب نیز وابسته است. تنها برای ۷۰ μs بررسی زمانی نشان می‌دهد که رشد توانی گسیل خود به خودی تقویت شده متوقف و به مقدار ثابت خود سوق پیدا کند. قله ASE و یا بیشینه بهره در طول موج ۱۰۷۶ nm توافق خوبی با نتایج به دست آمده تجربی [۲۲-۲۷] دارد.

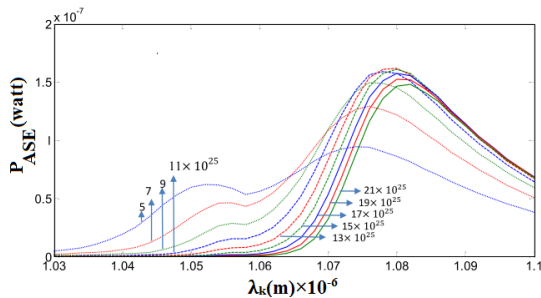


شکل ۴. شبیه‌سازی گسیل خود به خودی برانگیخته پیش‌رو برای چینش شکل (۳) و توان دمش ۱۰ W

آلاینده در الیاف‌های دو غلافی فعال رایج (نظیر آنچه که توسط کمپانی LIEKKI ارائه می‌شود) معمولاً به صورتی است که صرف نظر از نسبت قطر هسته به غلاف، برای دمش در ۹۷۶ nm، هسته یک جذب ۱۲۰۰ dB/m را داشته باشد. بنابراین بین غلظت‌ها رابطه $N_1 V_1 = N_2 V_2$ برقرار است. در ادامه طیف خروجی ASE در الیاف‌های دو غلافی مختلف برای میزان جذب در واحد طول یکسان (۱۲۰۰ dB/m)، با یکدیگر مقایسه می‌شود.

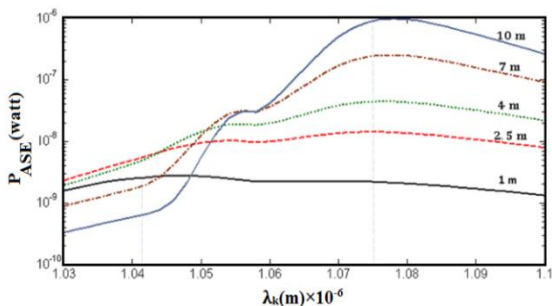
برای دو الیاف با غلظت آلاینده N_i و حجم هسته متفاوت رابطه $V_i = A_{i,core} L = \pi \left(\frac{d_{i,core}}{2}\right)^2 L_i$ هسته عبارت است از $N_2 = N_1 \left(\frac{d_{1,core}}{d_{2,core}}\right)^2$. با داشتن

خواهد کرد و در چگالی‌های پایین، افزایش طول بهره، افزایش آستانه لیزری، کاهش بازدهی و افزایش تلفات پراکندگی را موجب خواهد شد. بسته به نیاز کاری می‌توان از غلظت‌ها و طول‌های مختلف بهره جست زیرا مطابق شکل (۹)، پهنای طیف ASE برای غلظت‌های مختلف متفاوت است. به عنوان مثال برای داشتن بیشترین بهره تقویت در طول موج 1076 nm ، از یک الیاف YDF به طول 3.5 m متر با غلظت $N_0 = 13 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ می‌توان استفاده کرد. مشاهده می‌شود که توزیع توان برای غلظت‌های کمتر به سمت طول موج‌های پایین‌تر منتقل می‌شود.



شکل ۹. میزان توان ASE برای غلظت‌های متفاوت از YDF

در ادامه میزان توان ASE برای طول‌های متفاوت از الیاف شبیه‌سازی شده است. برای شرایطی که با آن شکل (۱۰) به دست آمده است. در طول‌های بزرگ‌تر از 1 m ، قله غالب ASE، در طول موج‌های بالاتر از 1.06 micrometers واقع می‌شود که افزایش طول، تنها توزیع توانی طیف را اطراف این بیشینه متمرکزتر خواهد ساخت. بدین ترتیب برای توان دمش ثابت، سطح توان در این بیشینه رشد پیدا می‌کند. بدین ترتیب استفاده از یک الیاف کوتاه‌تر و یا طول موج دمش کوتاه‌تر، کل طیف ASE را به سمت طول موج‌های کوچک‌تر سوق داده برعکس با توجه به نسبت متفاوت از سطح مقطع‌های جذب و گسیل در طول موج‌های مختلف، دمش در طول موج‌های بلندتر، طیف بهره را به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر انتقال خواهد داد.

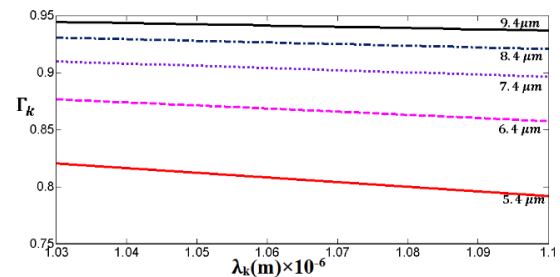


شکل ۱۰. میزان ASE برای طول‌های متفاوت الیاف و پارامترهای جدول (۱)، با نمایش لگاریتمی در محور عمودی

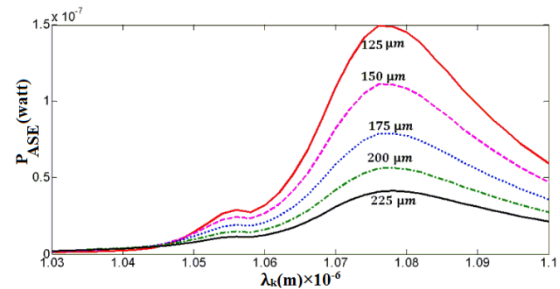
الیاف‌های YDF در این ناحیه ($1000 \sim 1200 \text{ nm}$) به عنوان یک سامانه شبه ۴ تراز، رفتار می‌کنند. سطح مقطع‌های جذب

مقطع عرضی الیاف بستگی دارد. شکل‌های مختلفی از غلاف برای افزایش ضریب پخشندگی (نسبت مساحت هسته به مساحت غلاف داخلی) به کار می‌رود تا طول مورد نیاز و آستانه لیزری در آن‌ها کاهش یابد [۲۸]. همان‌طور که از شکل پیدا است، اگر چه ضریب همپوشانی گسیل Γ_k برای انتخاب قطرهای بزرگ‌تر از هسته، افزایش پیدا می‌کند ولی انتگرال زیر منحنی طیف ASE نشان می‌دهد که با افزایش قطر هسته، عوامل کاهنده توان تقویت شده ASE در انتهای الیاف، نقش بیشتری نسبت به عوامل افزایش‌دهنده آن در دیگر جهت‌ها دارد.

برای یک قطر غلاف ثابت 125 micrometers و استفاده از داده‌های جدول (۱)، عامل همپوشانی گسیل Γ_k برای قطرهای مختلفی از هسته در شکل (۷) با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین توزیع توانی در طیف ASE برای چند قطر غلاف مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷. بستگی ضریب همپوشانی گسیل (Γ_k) به طول موج برای قطرهای متفاوت از هسته



شکل ۸. توزیع توانی طیف ASE برای قطرهای متفاوت از پوشش داخلی الیاف

با به‌کارگیری مشخصات جدول (۱)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی توان ASE برای غلظت‌های متفاوت از YDF در شکل (۹) نمایش داده شده است. در الیاف‌های با آلاینده‌گی بالا، مؤلفه‌های طیفی در طول موج‌های کوتاه‌تر، ضعیف‌تر نمایان می‌شوند. تفسیر این نتیجه با توجه به اینکه در طول موج‌های کوتاه‌تر سطح مقطع جذب بزرگ‌تر از سطح مقطع گسیل است به دست می‌آید (شکل (۲))، به ویژه آنکه افزایش غلظت موجب تشدید این اختلاف خواهد شد. انتخاب نامناسب آلاینده در چگالی‌های بالا اثرات خاموشی چگالی^۱ و خوشه‌ای شدن را تشدید

^۱ Concentration Quenching

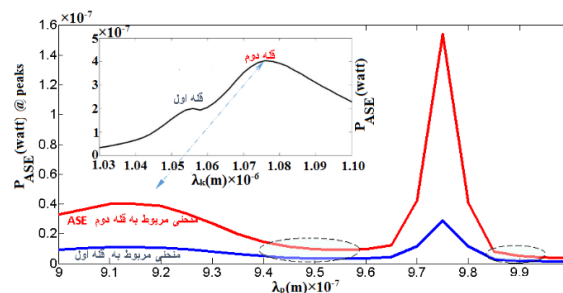
شبه چهار تراز است، طول موج پر بازده یا پر بهره و طول موج مرکزی FBG از روی مکان قله ASE در چینش مورد نظر قابل تعیین است. برای کارکرد در باقی طول موجها بهره را نمی توان تنها با ASE مرتبط دانست. برای یک جذب مشخص در طول الیاف، تغییرات در ضرایب همپوشانی و توزیع توانی ASE برای (نسبت های مختلف از قطر هسته به پوشش) مقادیر مختلف از غلظت مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که قله غالب برای غلظت های کمتر به سمت طول موج های پایین تر منتقل می شود. همچنین اثر طول الیاف، طول موج دمش، قطر الیاف مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که طیف گسیل از این طریق نیز قابل مهندسی است. به طور مثال یک طیف تخت یا پهنی از ASE به شرط دمش در نواحی خاص طول موجی قابل شکل گیری است و در مقابل بیشترین بهره را برای عملکرد تقویت کنندگی با دمش در طول موج ۹۷۶ nm می توان حاصل ساخت. نتایج بررسی های بیشتر برای کارکرد کلیدزنی ناکنا نشان می دهد که اگر چه دمش در ۹۱۵ nm نسبت به ۹۷۶ nm در شرایط برابر منجر به تولید تپ های ضعیف تر و نرخ تکرار کوچک تر می شود ولی در عوض می تواند پهنای کوچک تری از تپ را حاصل سازد. یکی دیگر از نتایجی که در انتها می توان به آن اشاره کرد، کاهش سطح توان ASE خروجی و انتقال قله طیف در آن، با افزایش قطر هسته است. بدین ترتیب مدل سازی هایی از این دست برای، درک دینامیک لیزر در رژیم های کاری مختلف و برای بهینه سازی یک عملکرد تقویت کننده نوری ابزاری مفید به حساب می آید.

۶. مراجع

- [1] Paschotta, R. "Encyclopedia of Laser Physics and Technology"; http://www.rp_photonics.com, 2006.
- [2] Injeyan, H.; Goodno, G. "High Power Laser Handbook"; McGraw Hill Professional, 2011.
- [3] Alzaidy, J. F. "Exact Travelling Wave Solutions of Nonlinear PDEs in Mathematical Physics"; Appl. Math. 2012, 3, 738-745.
- [4] Laroche, M.; Gilles, H.; Girard, S.; Passilly, N.; Ait-Ameur, K. "Nanosecond Pulse Generation in a Passively Q-Switched Yb-Doped Fiber Laser By Cr4+ :YAG Saturable Absorber"; IEEE Photon. Technol. Lett. 2006, 18, 764-766.
- [5] Moghaddam, M. R. A.; Harun, S.; Ahmad, H. "Comparison Between Analytical Solution and Experimental Setup of a Short Long Ytterbium Doped Fiber Laser"; Optics & Photonics J. 2012, 2, 65-72.
- [6] Harun, S.; Paul, M. C.; Moghaddam, M. R. A.; Das, S.; Sen, R.; Dhar, A.; Pal, M.; Bhadra, S. K.; Ahmad, H. "Diode-Pumped 1028 nm Ytterbium-Doped Fiber Laser with Near 90% Slope Efficiency"; Laser Phys. 2010, 20, 656-660.
- [7] Harun, S.; Moghaddam, M. R. A.; Dimiyati, K.; Ahmad, H. "The Performance of Double-Clad Ytterbium-Doped Fiber Laser With Different Pumping Wavelengths"; Laser Phys. Lett. 2009, 6, 458-460.

در ناحیه C در شکل (۲) (یعنی بالاتر از ۱۰۰۰ nm) نسبت به مقادیر آن ها در نواحی A و B کوچک تر هستند. بنابراین در این ناحیه در الیاف های دوغلافی برای دستیابی به بهره خالص بزرگ تر از آرایش های طولی تر باید استفاده نمود. شدت نسبی دو قله غالب ASE برای دمش در بازه ۹۰۰-۱۰۰۰ nm در شکل نمایش داده شده است.

بدین ترتیب بسته به کاربرد مورد نظر، می توان طیف ASE را مهندسی کرد. مثلاً طیف تخت تر یا پهن تر ASE به شرط دمش در نواحی حاشور زده در شکل (۱۱)، قابل شکل گیری است. در مقابل بیشترین بهره با دمش در نواحی خاص طول موجی nm ۹۷۶ می توان حاصل شود. همچنین این مدل نشان می دهد که برای دمش پیشرو در طول موج ۱۰۶۴ nm، قله ASE به سمت ناحیه طول موجی کوتاه تر در توان های دمشی پایین تر حرکت می کند. حتی در کارکرد کلید زنی ناکنا شبیه سازی و بررسی های بیشتر نشان می دهد که اگر چه دمش در ۹۱۵ nm نسبت به ۹۷۶ nm در شرایط برابر منجر به تولید تپ های ضعیف تر و نرخ تکرار کوچک تر می شود ولی در عوض می تواند پهنای کوچک تری از تپ را حاصل سازد.



شکل ۱۱. مقایسه شدت نسبی قله های اول و دوم موجود در طیف ASE با یکدیگر برای طول موج های دمشی متفاوت برای مقادیر به کار گرفته شده از جدول (۱) - شکل داخلی دو قله را در یک طیف نشان می دهد

۵. نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی توزیع دمش، وارونی جمعیت و معادلات نرخ، طیف خروجی گسیل خود به خودی تقویت شده در بازه ۱۱۰۰ nm - ۱۰۳۰ nm به کمک نرم افزار مطلب شبیه سازی شد. بررسی زمانی نشان داد که مدت ۷۰ μs کافی است که رشد گسیل خود به خودی به مقدار ثابت خود سوق پیدا کند. با رسم سه بعدی تابش برانگیخته تقویت شده در مدت زمان شکل گیری یا حضور یک تپ، نتایج چنین شبیه سازی می تواند برای تولید تپ های لیزری به روش ناکنا و یا برای تقویت آن ها مفید باشد. مقادیر ارائه شده از مکان قله ASE توافق خوبی با کارهای تجربی قبلی دارد [۹-۵]. در بازه ۱۲۰۰-۱۰۰۰ nm که در آن رفتار لیزر

- [19] Lowery, A. "Model for Multimode Picosecond Dynamic Laser Chirp Based on Transmission Line Laser Model"; IEEE P-Optoelectron 1988, 135, 126-132.
- [20] Zhang, L.; Carroll, J. "Large-Signal Dynamic Model of the DFB Laser"; IEEE J. Quantum Elect. 1992, 28, 604-611.
- [21] Bandelow, U.; Wunsche, H.; Wenzel, H. "Theory of Self Pulsations in Two-Section DFB Lasers"; IEEE Photonic Tech. Let. 1993, 5, 1176-1179.
- [22] Pan, L.; Utkin, I.; Fedosejevs, R. "Experiment and Numerical Modeling of High-Power Passively Q-Switched Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Lasers"; IEEE J. Quantum Elect. 2010, 46, 68-75.
- [23] Lu, K.; Dutta, N. K. "Spectroscopic Properties of Yb-Doped Silica Glass" J. Appl. Phys. 2002, 91, 576-581.
- [24] Liu, A.; Ueda, K. "The Absorption Characteristics of Circular, Offset, and Rectangular Double-Clad Fibers"; Opt. Commun. 1996, 132, 511-518.
- [25] Even, P.; Roncin, V.; Kerrinckx, B.; Pureur, D. "Theoretical Study of Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber for Laser Application"; Proc. SPIE 4216, 2001, 22-31.
- [26] Bouchier, A.; Lucas-Leclin, G.; Balembois, F.; Georges, P. M. "Theoretical and Experimental Investigations of a Single-Mode 976-nm Yb-Doped Fiber Amplifier"; Proc. SPIE 5460, 2004, 23-30.
- [27] Sun, Q.; Mao, Q.; Chen, X.; Feng, S.; Liu, W.; Lit, J. "Influences of ASE on the Performances of Q-Switched Ytterbium-Doped Fiber Lasers"; Laser Phys. 2010, 20, 1438-1448.
- [28] Müller, H. R.; Kirchhof, J.; Reichel, V.; Unger, S. "Fibers for High-Power Lasers and Amplifiers"; C. R. Phys. 2006, 7, 154-162.
- [8] Harun, S.; Paul, M. C.; Moghaddam, M. R. A.; Das, S.; Sen, R.; Dhar, A.; Pal, M.; Bhadra, S. K.; Ahmad, H. "Efficient Diode Pumped Ytterbium-Doped Fibre Laser"; Electron Lett. 2010, 46, 68-69.
- [9] Moghaddam, M. R. A.; "High Power Fiber Lasers"; 2nd Topical Meeting on Laser and Optoelectronics, Redang Island, Terengganu, 2010.
- [10] Koester, C. J.; Snitzer, E. "Amplification in a Fiber Laser"; Appl. Optics. 1964, 3, 1182-1186.
- [11] Pask, H.; Carman, R. J.; Hanna, D. C.; Tropper, A. C.; Mackechnie, C. J.; Barber, P. R. "Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1-1.2 μm Region"; IEEE J. Sel. Top. Quant. 1995, 1, 2-13.
- [12] Huo, Y.; Brown, R. T.; King, G. G.; Cheo, P. K. "Kinetic Modeling of Q-Switched High-Power Ytterbium-Doped Fiber Lasers"; Appl. Optics 2004, 43, 1404-1411.
- [13] Wang, Y.; Xu, C. Q. "Actively Q-Switched Fiber Lasers: Switching Dynamics and Nonlinear Processes"; Prog. Quantum Electron. 2007, 31, 131-216.
- [14] Zahradnik, P.; Peterka, P.; Vojtišek, P.; Honzatko, P. "Numerical Modeling of All-Fiber Passively Q-Switched Fiber Lasers"; Proc. SPIE 86971L. 2012, 1-7.
- [15] Huang, J.; Liang, H.; Su, K.; Chen, Y. "Analytical Model for Optimizing the Parameters of an External Passive Q Switch in a Fiber Laser"; Appl. Optics, 2008, 47, 2297-2302.
- [16] Arecchi, F.; Bonifacio, R. "Theory of Optical Maser Amplifiers"; IEEE J. Quantum Elect. 1965, 1, 169-178.
- [17] Tromborg, B.; Olesen, H.; Pan, X.; Saito, S. "Transmission Line Description of Optical Feedback and Injection Locking for Fabry-Perot and DFB Lasers"; IEEE J. Quantum Elect. 1987, 23, 1875-1889.
- [18] Vankwikelberge, P.; Morthier, G.; Baets, R. "CLADISS-A Longitudinal Multimode Model for the Analysis of the Static, Dynamic, and Stochastic Behavior of Diode Lasers with Distributed Feedback"; IEEE J. Quantum Elect. 1990, 26, 1728-1741.