

## مدل سازی اثرات گسیل خود به خودی-تقویت شده و اثرات گرمایی در یک لیزر فیبری دو غلافی ایتربیومی در کارکرد کلیدزنی ناکنا

محمد رضا عبدالحسینی مقدم<sup>۱\*</sup>، سیدرضا زارع کلاته<sup>۲</sup>، شریفه شاهی<sup>۳</sup>، حسین ثقفی فر<sup>۴</sup>

**چکیده:** در این تحقیق یک مدل موج رونده چند طول موجی در حوزه زمان و گستره  $1.1 \mu\text{m} - 0.9 \mu\text{m}$ ، برای شبیه سازی طیف گسیل خودبه خودی تقویت شده در محیط بهره فیبری ایتربیومی مورد استفاده قرار گرفته است. نشان داده می شود که به چه میزان انتخاب طول موج دمش، در مشخصه های بهره و ASE همچنین کارکرد کلیدزنی-Q (با یک بلور  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )، می تواند موثر باشد. استفاده از طول موج های دمش  $915 \text{ nm}$  و  $950 \text{ nm}$  نانومتر اگرچه می تواند با ایجاد یک طیف پهن، شرایط مناسبی را برای قفل شدگی مد فراهم سازد، ولی در رژیم کلیدزنی Q ناکنا، به تولید تپ های کم انرژی منجر خواهد شد. این کاهش در شدت، همچنین سطح توانی ASE و انرژی هر تپ، می تواند به تولید گرمای بیشتر در جاذب (در فاصله بین دو تپ) منجر شود. این اثر در توان متوسط بالا، عامل پرش و تغییر تدریجی در نرخ تکرار و انرژی هر تپ خواهد شد.

**واژه های کلیدی:** تابش خودبه خودی-تقویت شده، روش موج رونده، فیبر ایتربیوم دو غلافی، جاذب اشباع پذیر.

### ۱. مقدمه

برای افزایش میانگین توان لیزر در یک طرح فیبری به نظر می رسد تا حدی که عملاً اجازه داریم بهتر است اندازه هسته را بزرگ کنیم و آنرا به شدت با یک چشمه دمش تحریک کنیم. در تلاش برای رسیدن به این هدف به زودی به این نتیجه خواهیم رسید که با هر ابعادی از فیبر، توان خروجی لیزر توسط، گسیل های خودبخودی

تقویت شده (ASE) و شکست گرمایی محدود می شود. به عبارت دیگر از یک طرف افزایش توان دمش باعث افزایش بار گرمایی می شود و از طرف دیگر افزایش سایز دهانه بهره، توسط محدودیت های ساختاری و اتلاف های ناشی از ASE محدود می شود. باید توجه داشت که در محیط بهره لیزری برخی از یون های فعال لیزری بعد از برانگیزش نوری، بطور خودبخودی گسیل نوری خواهند داشت که این نور فلور سانس تولیدی عمدتاً از کنار فیبر خارج می شوند. با این حال قسمت کمی از آن در امتداد فیبر منتشر شده و در نهایت تقویت شدید می شوند. بدین ترتیب محدودیت عمومی در تقویت گسیل برانگیخته نه تنها از گرما بلکه از ASE ناشی می شود و برای جلوگیری از کاهش بهره سیگنال باید مراقب بود تا دمش (در طول موجهای پایین)، ASE را در باند قوی (جذب-گسیلی) شکل ندهد.

(۱) استادیار، پژوهشگر لیزر و اپتیک، تهران خیابان کارگر شمالی  
P.O. Box 14155-1339\_

[mrammoghaddam@gmail.com](mailto:mrammoghaddam@gmail.com)

(۲) کارشناسی ارشد از پژوهشگاه علوم و فناوری اپتیک و لیزر، مجتمع علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان:

[z\\_reza\\_12@yahoo.com](mailto:z_reza_12@yahoo.com)

(۳) عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان:

[Norshahi9@gmail.com](mailto:Norshahi9@gmail.com)

(۴) هیات علمی پژوهشگاه علوم و فناوری اپتیک و لیزر، مجتمع علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان:

[saghafifar1@yahoo.com](mailto:saghafifar1@yahoo.com)

## ۲. مدل سازی نظری

در این مقاله با اعمال شرایط مرزی مناسب، معادلات نرخ جفت شده [۲-۵] با نرم افزار MATLAB حل می شود:

$$N_0 = N_1(t) + N_2(t) \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2(x,t)}{\partial t} = & \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA_{co}} [\sigma_{ap} N_1(x,t) - \sigma_{ep} N_2(x,t)] P_p^-(x,t) + \\ & \sum_k \frac{\Gamma_k \lambda_k}{hcA_{co}} [\sigma_{ak} N_1(x,t) - \sigma_{ek} N_2(x,t)] \times \\ & (P_k^+(x,t) + P_k^-(x,t)) - N_2(x,t) / \tau \quad (۲) \\ & \pm \frac{\partial P_p^\pm(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(x,t)}{\partial t} = \\ & \Gamma_p [\sigma_{ep} N_2(x,t) - \sigma_{ap} N_1(x,t)] P_p^\pm(x,t) - \\ & \alpha_p \cdot P_p^\pm(x,t) \quad (۳) \\ & \pm \frac{\partial P_k^\pm(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{v_k} \frac{\partial P_k^\pm(x,t)}{\partial t} = \Gamma_k [\sigma_{ek} N_2(x,t) - \\ & \sigma_{ak} N_1(x,t)] P_k^\pm(x,t) - \alpha_k \cdot P_k^\pm + N_2(x,t) \xi_k \quad (۴) \end{aligned}$$

در این دسته از معادلات، اثرات غیرخطی مورد مشاهده در تارهای آلاییده با غلظت‌های بالا نظیر برهمکنش دوقطبی-دوقطبی، اثر خوشه ای شدن و خاموشی چگالی نادیده گرفته شده‌اند. در این معادلات،  $N_1$  و  $N_2$  چگالی-های حالت پایه و برانگیخته،  $N_0$  غلظت کلی یون  $Yb^{3+}$  در محیط بهره،  $P_p^\pm$  نمایانگر انتشار پیش رو و پس‌رو توان دمش و  $P_k^\pm$  مربوط به انتشار پیش‌رو و پس‌رو پرتوی لیزر است. همچنین نمایه مربوط به طول موج‌های گسیلی که به صورت همزمان انتشار می‌یابند با  $k$  مشخص گردیده است. سطح مقطع‌های جذب و گسیل  $Yb^{3+}$  در طول موج دمش (و گسیل)، نیز در معادلات نرخ بصورت  $\sigma_{ap}$ ،  $\sigma_{ep}$ ،  $\sigma_{ak}$  و  $\sigma_{ek}$  نمایش داده شده‌اند که مقادیر آن مطابق با داده‌های فیبرهای تجاری شرکت LIEKKI در نظر گرفته شده است [۶]. در این معادلات  $\mathcal{A}_p(k)$ ،  $U_p(k)$  به ترتیب طول موج و سرعت‌های گروه دمش (گسیل) در حلال هستند. سرعت‌های گروه برای دمش و گسیل با مقدار  $C/n$  محاسبه می‌شوند که در آن  $C$  سرعت نور در

برای طول موج‌هایی با بهره بزرگتر از ۳۰ dB ASE می‌تواند بخش قابل توجهی از توان اپتیکی را تخلیه کند. بدون پالایش ASE، حتی با دمش‌های قوی رسیدن به بهره بالای ۴۰ dB مشکل خواهد بود [۱]. بطور کلی از نظر نوع کاربرد، تقویت کننده‌ها به پیش تقویت کننده‌ها، تقویت کننده میانی و بوستر تقسیم می‌شوند، که در هر یک، ممکن است بهره تقویت، کاهش نویز و یا افزایش پهنای باند از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. مثلاً تقویتگرهای میانی، باید پهن باند یا تخت باند با حداقل نویز طراحی گردند. در این حالت دقت لازم صورت می‌گیرد که طیف بهره چند بیشینه‌ای نباشد و معمولاً طول موج‌های دمشی انتخاب می‌گردد که با آنها نوفه در تقویت افزایش نیابد.

برای بررسی پارامترهای موثر در روش کلیدزنی-Q-ناکنا یا غیرفعال نیز، همواره رفتار سامانه ابتدا بدون جاذب اشباع پذیر و آینه‌ها، از طریق شبیه سازی ASE باید مورد ارزیابی قرار گیرد تا سهم توانی آن درطیف خروجی مشخص گردد. در کارکرد تپی هنگامی که دوره زمانی تپ از طول عمر تراز بالایی لیزری فراتر رود اگرچه بهره دریافتی هر تپ بیشتر می‌شود ولی گسیل‌های خودبه-خودی در فاصله زمانی بین دو تپ، در همه جهات گسترش و تقویت می‌شود. در این حالت برای تقویت سازی تپ‌های کوتاه تر با نرخ تکرار پایین‌تر، سهم تقویت سازی بیش از آنکه بر روی تپ مورد نظر صورت گیرد بر روی ASE صورت خواهد گرفت. مجدداً هرگونه پالایش موثر نویز یا به کارگیری هر گونه المان اپتیکی مبتنی بر اتلاف غیرخطی، منوط به دانستن مشخصه طیف همراه شده با تپ خواهد بود. تنها بر مبنای این اطلاعات طیفی است که می‌توان ساختار مناسب را برای یک تشدیدگر یا تقویتگر، برای کارکرد پیوسته یا تپی انتخاب نمود.

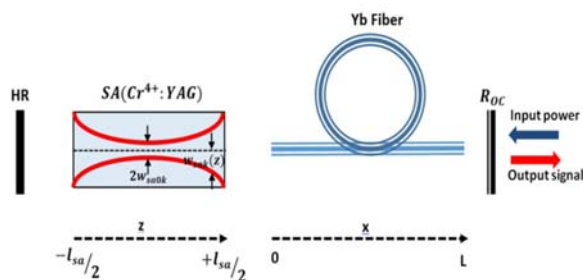
در این مقاله با بکارگیری روش موج رونده و اعمال شرایط اولیه مناسب، به کمک نرم‌افزار متلب معادلات نرخ حل شده تا اثر طیف خروجی ASE در یک فیبر دوغلافی بر روی عملکرد کلیدزنی-Q-ناکنا به مشخصه‌های تپ و فیبر مرتبط شود.

توسط  $P_{sak}^{\pm}$  نمایش داده شده است. برای  $Cr^{4+}:YAG$  سطح مقطع‌های حالت پایه و برانگیخته، طول عمر حالت برانگیخته (زمان بازیابی) جاذب به ترتیب با  $\sigma_{gsak}$ ،  $\sigma_{esak}$  و  $\tau_{sa}$  معین شده‌اند. سرعت نور در جاذب  $v_{sa} = c/n_{sa}$  و ضریب شکست در آن ( $n_{sa} = 1.87$ ) متفاوت از محیط بهره  $n_f = 1.45$  در نظر گرفته شده است. بخشی از ضریب جذب که از شدت پرتو و میزان اشباع شدگی مستقل است (ضریب اتلاف جاذب) با  $\alpha_{sa}^0 = 10 \text{ m}^{-3}$  نمایش داده می‌شود. فرض بر آن است که پرتو در جاذب به صورت گاوسی منتشر می‌شود و اندازه باریکه در جاذب  $\omega_{sak}(z)$  از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\omega_{sak}(z) = \omega_{sa0k} \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$z_0k = \frac{\pi \omega_{sa0k}^2 n_{sa}}{\lambda_k} \quad (11)$$

که در آن  $\omega_{sa0k}(z)$  کمره باریکه، با قطر میدان مدی در فیبر و نسبت فاصله کانونی عدسی‌های متمرکز کننده پرتو بر روی جاذب کنترل می‌شود. بنابراین مساحت شدت نوری در هر نقطه بصورت  $A_{sak}(z) = \pi \omega_{sak}^2(z)$  محاسبه می‌گردد. ثابت می‌شود که بیشینه انرژی تپ با قرار گرفتن دقیق کمر باریکه در میان جاذب بدست می‌آید [۵]. همانطور که در شکل ۱ به صورت طرحواره نشان داده شده است این نکته در شبیه سازی رعایت گردیده است.



شکل ۱. طرح کلی شبیه‌سازی برای حالت دمش پسر: HR آینه با بازتاب کامل،  $R_{oc}$  بازتابندگی در تزویجگر خروجی،  $x$  متغیر مکان در طول فیبر فعال،  $z$  متغیر مکان در طول جاذب،  $l_{sa}$  ضخامت جاذب و  $L$  طول فیبر فعال

خلاء و  $n$  ضریب شکست فیبر می‌باشد. همچنین  $h$  ثابت پلانک،  $\tau$  طول عمر حالت برانگیخته یون  $Yb^{3+}$  و  $\alpha_{p(k)}$  اتلاف فیبر در طول موج دمش (گسیل) است. عبارت  $N_2(x, t) \xi_k$  در رابطه (۴) مربوط به گسیل خود به خودی در هسته فیبر 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  $Wm^2$  می‌باشد. در معادلات فوق عامل‌های همپوشانی  $\Gamma_{p(k)}$  با فرض گاوسی بودن شکل موج گسیلی و فرض مستقل از طول موج بودن عبارتست از:

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

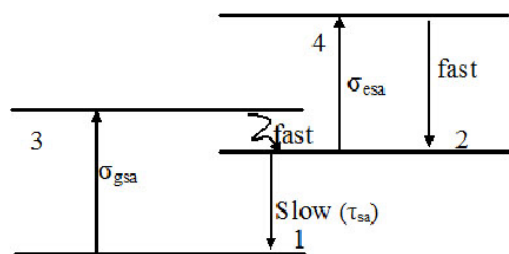
$$\Gamma_k = 1 - \exp\left(-2d_{core}^2/4\omega^2\right) \quad (6)$$

که در آن  $d_{clad}$  و  $d_{core}$  قطرهای هسته و غلاف هستند. در کلیدزنی-Q-ناکنا، اتلاف غیر خطی در محیط، توسط یک جاذب اشباع‌پذیر مثلاً  $Cr^{4+}:YAG$  به وجود می‌آید [۷]. در معادلات زیر از روش موج رونده [۸] برای درک فرایند شکل‌گیری تپ [۹-۱۵] استفاده شده است، که این روش، روشی متداول برای تبدیل معادلات مشتق جزئی است.

$$N^{sa} = N_1^{sa}(t) + N_2^{sa}(t) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2^{sa}(z, t)}{\partial t} = & \sum_k \lambda_k / h c A_{co} \sigma_{gsak} N_1^{sa}(z, t) [P_{sak}^-(z, t) + \\ & P_{sak}^+(z, t)] - N_2^{sa}(z, t) / \tau_{sa} \quad (8) \\ \pm \frac{\partial P_{sak}^{\pm}(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{v_{sa}} \frac{\partial P_{sak}^{\pm}(z, t)}{\partial t} = & [-\sigma_{gsak} N_1^{sa}(z, t) - \sigma_{esak} N_2^{sa}(z, t)] P_{sak}^{\pm}(z, t) - \\ & \alpha_{sa}^0 \cdot P_{sak}^{\pm}(z, t) \quad (9) \end{aligned}$$

که در آن به ترتیب  $N_{sa} = 6.7 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  غلظت کل یون‌های آلاینده  $Cr^{4+}$  در جاذب،  $N_{sa}^1$  و  $N_{sa}^2$  چگالی‌های موجود در حالت‌های پایه و برانگیخته هستند. توزیع توانی پیشرو و پسر، گسیل‌های مختلف ( $k$ ) در جاذب

شکل ۲. مدل چهار ترازوی Cr<sup>4+</sup>:YAG

در جاذب اشباع پذیر با داشتن نسبت بین سطح مقطع جذب حالت زمینه و برانگیخته در یک طول موج مشخص [۱۳]، می توان برای دیگر طول موج ها (مثلاً ۱۰۷۲-۱۰۷۴nm) این نسبت ( $\sigma_{gsa}/\sigma_{esa} = 3$ ) و مقدار  $\sigma_{gsa}$  ( $20 - 3.8 \times 10^3 \text{ cm}^2$ ) را محاسبه کرد [۱۳].

### ۳. مدل سازی کلیدزنی-Q

در شکل ۳ قطار شبیه سازی شده از تپ های لیزری با نتایج تجربی در یک چینش یکسان مقایسه شده است. در چینش تجربی دمش پسر (W ۱۰،۱ - ۹۷۶ nm) و نسبت قطری ۵،۴/۱۳،۵ برای هسته به غلاف (فیبر فعال) برای یک فیبر ۳ متری در نظر گرفته شده است. همچنین عدسی های لازم برای تنظیم قطر لکه روی جاذب اشباع پذیر و روزنه های عددی ۰،۱۵ و ۰،۴۶ برای هسته و غلاف، دقیقاً یکسان در نظر گرفته شده اند. آلایش در فیبرهای دو غلافی فعال (Liekki) معمولاً به صورتی است که صرفنظر از نسبت قطر- هسته به غلاف، یک جذب ۱۲۰۰ dB/m در ۹۷۶ nm امکان پذیر باشد. هنگام مقایسه طیف ASE برای قطرهای مختلف هسته، در این شرایط (میزان جذب در واحد طول یکسان)، همواره بین غلظتهای ماده فعال در هسته رابطه  $N_1V_1 = N_2V_2$  برقرار شده است. محور عمودی در این شکل دارای واحد اختیاری (شدت نسبی) است.

برای حل معادلات نرخ، برآورده شدن شرایط مرزی ضروری است برای مثال در شکل فوق:

$$P_p^-(L, t) = P_0 \quad (12)$$

$$P_k^-(L, t) = P_k^+(L, t)R_{oc} \quad (13)$$

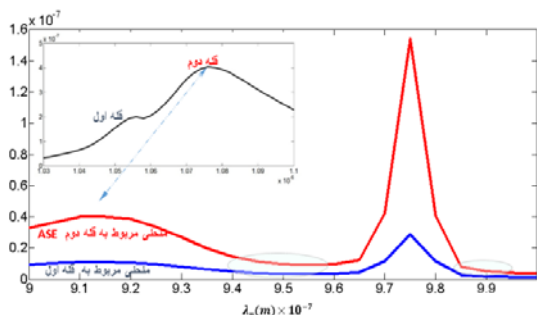
$$P_{sak}^-(l_{sa}/2, t) = P_k^-(0, t) \cdot (1 - \eta) \quad (14)$$

$$P_{sak}^+(-l_{sa}/2, t) = P_{sak}^-(-l_{sa}/2, t) \quad (15)$$

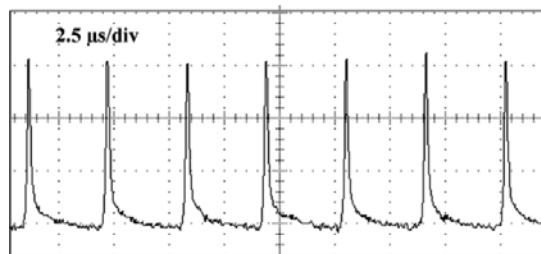
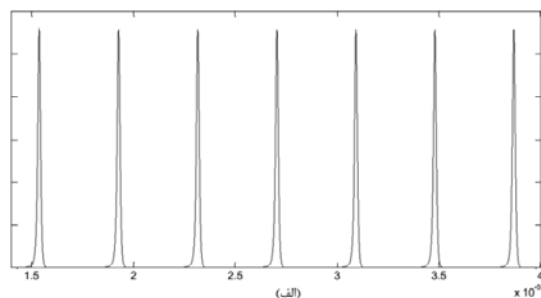
$$P_{out-k}(t) = P_k(L, t)(1 - R_{oc}) \quad (16)$$

در این معادلات  $P_0$  توان دمش،  $P_{out-k}$  توان خروجی برای مولفه  $k$  ام طول موجی،  $L$  طول فیبر،  $l_{sa}$  ضخامت جاذب ( $\Gamma, \Omega$  mm) و  $R_{oc}$  بازتاب آینه خروجی (۴٪) می-باشد. همچنین اتلاف برای یک بار عبور از کاواک  $\eta \sim 15\%$  در نظر گرفته شده است، که ناشی از بازتاب-های فرنل از سطوح فیبر، بازدهی جفت شدگی در عدسی ها و اتلاف در لایه های نازک می باشد. در این بررسی برای حل عددی معادلات از گام های مکانی  $dz = L_{sa}/50$ ،  $dx = L/200$  و گام های زمانی  $dt = dx/(nc)$  استفاده شده است. برای بررسی طیفی نیز، ۳۶ طول موج بین ۱۰۳۰ تا ۱۱۰۰ nm با فاصله  $\Delta\lambda = 2nm$  در نظر گرفته شده است.

در شکل ۲، یک مدل چهار ترازوی از ساختار انرژی در Cr<sup>4+</sup>:YAG نشان داده شده است. جذب های اپتیکی یک گذار از تراز حالت پایه ۱ به تراز ۳، سپس در یک فرآیند خودبه خودی به سرعت به تراز ۲ ایجاد می کند. در این مقاله طول عمر افت خودبه خودی از تراز ۲ به ۱ ( $T_{sa}$ ) در جاذب اشباع پذیر یک میکروثانیه فرض می شود. طول عمر مشابه برای افت بین ترازهای ۴ به ۲ در حدود میکروثانیه می باشد. این بلورها با مشخصه های متفاوتی از سطح مقطع پایه و برانگیخته قابل تولید هستند. مانند بسیاری از مراجع در طول موج ۱۰۶۴ nm، مقدار  $18 - 4.3 \times 10^3 \text{ cm}^2$  برای  $\sigma_{gsa}$  می تواند در نظر گرفته شود [۹-۱۲].

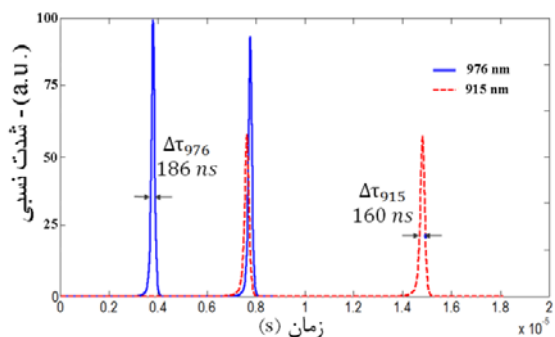


شکل ۴. مقایسه شدت نسبی قله‌های اول و دوم طیف ASE برای طول موجهای دمشی متفاوت - شکل داخلی دو قله را در یک طیف نشان می‌دهد  
 برای کارکرد کلید زنی ناکنا بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که اگرچه در شرایط برابر، دمش در طول موج ۹۱۵ nm نسبت به ۹۷۶ nm، به تولید تپ‌های کم انرژی‌تر با نرخ تکرار کوچکتر منجر می‌شود ولی در عوض از این طریق، پهناهای کوچکتری از تپ حاصل خواهد شد.



شکل ۳. مقایسه قطار تپ در یک چینش با دمش پسر و (۱۰،۱ @ ۹۷۵ nm): (بالا) تپ شبیه سازی شده، (پایین) ثبت تجربی [۱۵].

همانطور که مشخص است در این حالت قطار پایداری از تپ با نرخ تکرار ۲۵۶ kHz تولید می‌گردد.  
 شکل داخلی ۴ وجود دو قله غالب را در یک طیف (ASE) نشان می‌دهد. در این شکل همچنین شدت نسبی قله‌های اول و دوم موجود در طیف ASE (در شرایط یکسان) برای طول موج‌های دمش مختلف با یکدیگر مقایسه گردیده است. این مقایسه برای حالتی است که در آن آینه HR و SA در چینش شکل ۱ حذف شده باشد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، برای کاربردهای مختلف، می‌توان طیف ASE را مهندسی کرد. مثلاً طیف تخت‌تر یا پهن‌تر ASE به شرط دمش در نواحی حاشور زده قابل شکل‌گیری است. در مقابل بیشترین بهره با دمش در نواحی خاص طول موجی ۹۷۶ nm می‌توان حاصل شود. در این شکل طول موج دو قله غالب فلورسانسی نمایش داده نشده است ولی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که دمش پیشرو با طول موج‌های بلندتر، منجر به انتقال قله‌های ASE به سمت ناحیه طول موجی کوتاه‌تر خواهد شد.

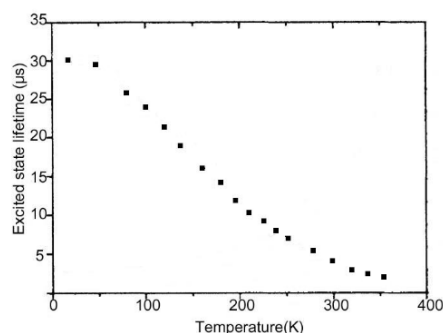


شکل ۵. مقایسه نرخ تکرار، پهناهای تپ لیزر و شدت نسبی در قطار تپ خروجی برای دو طول موج دمش ۹۱۵ nm و ۹۷۶ - چینش و توان دمش یکسان  
 همانطور که شکل ۶ نشان می‌دهد در بلور Cr<sup>4+</sup>:YAG طول عمر حالت برانگیخته  $\tau_{sa}$  از حدود ۳۰ μs در دمای ۱۵ K به ۲ μs در ۳۶۰ K کاهش پیدا می‌کند [۱۵].

مقایسه گردید. چون اصلی ترین اتلاف در تشدیدگرهای لیزری از این دست، توسط جاذب اشباع پذیر و به صورت غیرخطی ایجاد می گردد و چون برای طول مورد نظر از ماده فعال، میزان ASE و سطح توان خروجی در کارکرد پیوسته برای طول موج دمشی ۹۱۵ nm نسبت به ۹۷۶nm پایین تر است، انتظار می رود که طول موج های دمشی نظیر ۹۱۵ nm، بخاطر ماهیت غیر خطی اتلاف در جاذب، اثرات نوسانی بر روی پهنای تپ، نرخ تکرار و انرژی بر تپ در طولانی مدت داشته باشند. مقایسه دقیق تر پهنای و نرخ تکرار تپ در طول موج دمشی ۹۱۵ nm (به دلیل سطح مقطع جذب کمتر نسبت به طول موج ۹۷۶ nm) نشان می دهد که به کارگیری این طول موج دمشی، به تولید تپ های کم انرژی تر با نرخ تکرار کوچکتر منجر خواهد شد. هرچند این کاهش نرخ تکرار، یک زمان بازیابی کافی برای جاذب اشباع پذیر مهیا می کند که منجر به کاهش پهنای تپ می شود ولی اگر این کاهش شدت و تولید گرمای بیشتر توسط ASE در جاذب (در فاصله بین دو تپ) ادامه یابد، پرش و تغییر تدریجی در نرخ تکرار و انرژی هر تپ مشهودتر خواهد شد.

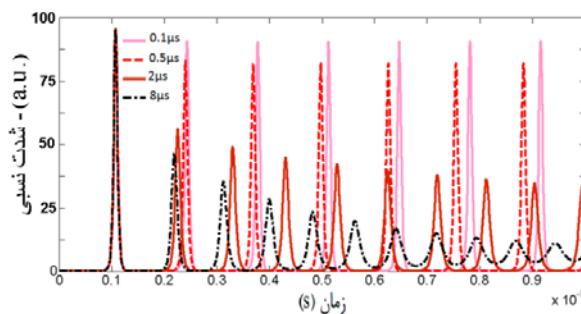
## مراجع

- [1] Paschotta R., *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, vol. 1, Wiley-Vch Berlin, 2008.
- [2] Huo Y., Brown R. T., King G. G., Cheo P. K., *Kinetic Modeling of Q-Switched High-Power Ytterbium-Doped Fiber Lasers*, Applied Optics, Vol. 43, No. 6, 2004, pp. 1404-1411.
- [3] Wang Y., Xu C.-Q., *Actively Q-Switched Fiber Lasers: Switching Dynamics and Nonlinear Processes*, Progress in Quantum Electronics, Vol. 31, No. 3, 2007, pp.131-216.
- [4] Zahradnik P., Peterka P., Vojtíšek P., Honzátko P., *Numerical Modeling of All-Fiber Passively Q-Switched Fiber Lasers*, 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, International Society for Optics and Photonics, 2012, pp. 86971L-86971L-86977.
- [5] Huang J., Liang H., Su K., Chen Y., *Analytical Model for Optimizing The Parameters of an External Passive Q-Switch In a Fiber Laser*, Applied Optics, Vol. 47, No. 13, 2008, pp. 2297-2302.
- [6] Moghaddam M. R. A., Harun S., Ahmad H., *Comparison Between Analytical Solution and Experimental Setup of a Short Long Ytterbium Doped Fiber Laser*, Optics and Photonics Journal, Vol.2, 2012, pp. 65-72.



شکل ۶. وابستگی زمانی بلور Cr<sup>4+</sup>:YAG به دما [۱۵].

بنابراین تغییر زمان  $\tau_{sa}$  بر اثر گرما (که می تواند از شکل گیری ASE کم شدت در میان دو تپ متوالی ناشی شود) به جیتتر زمانی (خواه به صورت پرش و یا کاهش تدریجی-نرخ تکرار) یا تغییرات در انرژی تپ منجر خواهد شود (شکل ۷).



شکل ۷. تغییر نرخ تکرار و ایجاد نوسانات در انرژی تپ با

تغییر طول عمر حالت برانگیخته  $\tau_{sa}$

بلعکس اگر زمان بازیابی جاذب بیشتر از مدت زمان بین دو تپ باشد، جاذب قبل از اینکه کاملاً به حالت اولیه خود باز گردد دوباره اشباع می شود و این روند در تپ های بعدی نیز ادامه پیدا می کند تا اینکه جاذب فرصت بازیابی خود را از دست داده و قطار خروجی میرا می گردد (شکل ۷).

## ۴. نتیجه گیری

در این شبیه سازی سعی شد تا تاثیر پارامترهای مختلف در عملکرد کلیدزنی-Q ناکنا مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار معادلات نرخ به کمک روش موج رونده حل و توسط نرم افزار متلب شبیه سازی شد. با استفاده از یک جاذب اشباع پذیر Cr<sup>4+</sup>:YAG در یک چینش مشابه لیزری، تپ خروجی در شرایط یکسان با نتایج تجربی

- Saturable Absorber*, J. Optoelectron. Laser, Vol. 9, 1998, pp. 453-457.
- [12] <http://eksmaoptics.com/out/media/YbKGW.pdf>.
- [13] Ridderbusch H., Graf T., *Saturation of 1047 and 1064 nm Absorption in Cr<sup>4+</sup>: YAG Crystals*, IEEE Journal of Quantum Electronics Vol.43, No. 2, 2007, pp. 168-173.
- [14] Pan L., Utkin I., Fedosejevs R., *Experiment and Numerical Modeling of High-Power Passively Q-Switched Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Lasers*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.46, No. 1, 2010, pp. 68-75.
- [15] Kuck S., Petermann K., Pohlmann U., Huber A. G., *Near-Infrared Emission of Cr-Doped Garnets: Lifetimes, Quantum Efficiencies, and Emission Cross Sections*, Phys. Rev B, Vol.51, 1995, pp. 17323-17331.
- [7] Hakulinen T., *Towards Stabilized, Short Pulse Q-Switched Fiber Lasers*, Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication, 2010.
- [8] Griffiths G., Schiesser W. E., *Traveling Wave Analysis of Partial Differential Equations: Numerical and Analytical Methods With Matlab and Maple*, Academic Press, 2010.
- [9] Shimony Y., Burshtein Z., Kalisky Y., *Cr<sup>4+</sup>:YAG as Passive Q-Switch and Brewster Plate in a Pulsed Nd:YAG Laser*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 31, No. 10, 1995, pp. 1738-1741.
- [10] Xiao G., Lim J. H., Yang S., Van Stryland E., Bass M., Weichman L., *Z-Scan Measurement of The Ground and Excited State Absorption Cross Sections of Cr<sup>4+</sup> in Yttrium Aluminum Garnet*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 35, No. 7, 1999, pp. 1086-1091.
- [11] Zhang X., Zhao S., Wang Q., Wang S., Sun L., Zhang S., Yao G, Zhang Z., *Measurement of Absorption Cross Section and Ground State Recovery Time of Cr<sup>4+</sup>-Doped*



# Modeling of Amplified Spontaneous Emission and Thermal Effects in an Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Laser in a Passive Q-Switching Regime

Mohammad Reza Abdolhosseini Moghaddam<sup>1\*</sup>, S. Reza Zare Kalate<sup>2</sup>, Sharifeh Shahi<sup>3</sup>, Hossein Saghafifar<sup>4</sup>

1) Assistant professor, Laser and Optics research school, NSTRI, Tehran, Iran.

[mrammoghaddam@gmail.com](mailto:mrammoghaddam@gmail.com)

2) Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

[z\\_reza\\_12@yahoo.com](mailto:z_reza_12@yahoo.com)

3) Assistant professor, Dental Faculty of Islamic Azad University, Isfahan (Khorasgan) Branch, Iran

[Norshahi9@gmail.com](mailto:Norshahi9@gmail.com)

4) Assistant professor, Physics Department, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[saghafifar1@yahoo.com](mailto:saghafifar1@yahoo.com)

## Abstract

The multi-wavelength traveling wave model with rate equations is utilized to predict the ASE spectrum of DC-YDFA in time domain and 0.9-1.1  $\mu\text{m}$  region. The model shows how the pumping wavelength can affect the amplifier operation and change the specification of the gain, the ASE spectrum and the switching regime. Utilising of pumping wavelengths near 915 and 950 nm although will cause to broaden the output spectrum and to prepare the good condition for mode locking regime, however in Q-switched regime it can reduce the amount of energy for pulses in train. Due to generated excess heat in this situation, the period between pulses exhibits a large timing jitter which is mainly caused by selecting inappropriate pump wavelengths and spontaneous emission noise. Therefore the performance of laser can be subsequently degraded by timing jitter and also fluctuations of energy.

**Keywords:** Amplified Spontaneous Emission, Traveling Wave Model, Ytterbium Doped Double-Clad Fiber, Saturable Absorber