



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۲-۱۳۳-۱۰-A

طراحی تقویت کننده فیبری تک-عبوری Tm:ZBLAN با در نظر گرفتن اثر ASE

مریم ایلچی قزائنی

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، تهران، ایران

milchi@aeoi.org.ir

چکیده - در این مقاله، یک تقویت کننده فیبری تک عبوری ZBLAN با آلاییدگی تولیم (Tm) در محدوده طول موجی IR ارائه شده است. مدل سازی عددی بر اساس حل معادلات نرخ پایا (موج پیوسته) با در نظر گرفتن اثر نویز گسیل خودبخودی تقویت شده (ASE) انجام شده است. از طول موج 1050 nm به منظور تقویت ناحیه باند-S مخابراتی استفاده شده است و سیگنال در طول موج 1460 nm تقویت می شود. به این ترتیب، با بررسی عملکرد پارامترهای مختلف، شرایط بهینه تقویت به دست آمده است.

کلید واژه- تقویت کننده فیبری، تولیم-فلوراید، ZBLAN، گسیل خودبخودی تقویت شده (ASE)، مدل سازی عددی.

Design of the single-pass Tm:ZBLAN Fiber Amplifier by Considering the ASE Effect

Maryam Ilchi-Ghazaani

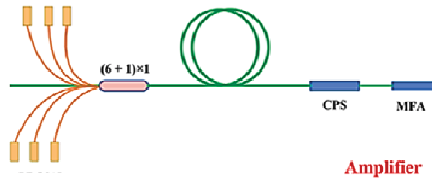
Nuclear Science and Technology Research Institute, Photonics and Quantum Technologies Research School, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, a single-pass ZBLAN fiber amplifier with thulium (Tm) dopant in the IR wavelength range is presented. Numerical modeling is based on solving steady-state (continuous wave) rate equations taking into account the effect of spontaneously amplified emission noise (ASE). A wavelength of 1050 nm is used to amplify the S-band communication area, and the signal is amplified to a wavelength of 1460 nm. Furthermore, by investigating the performance of various parameters, the optimal conditions of the amplifying is obtained.

Keywords: Fiber Amplifier, Thulium-Fluoride, ZBLAN, Amplified Spontaneous Emission (ASE), Numerical Modeling.

تئوری

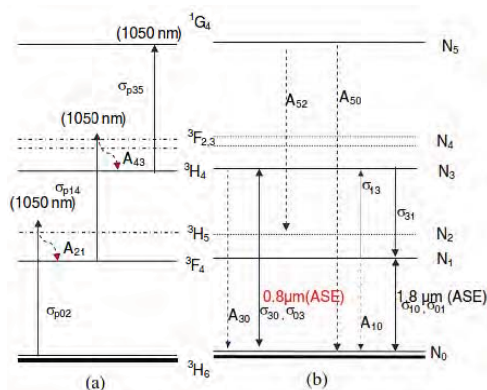
شکل (۱)، طرحواره یک تقویت کننده فیبری تک-عبوری را نشان می دهد که از لیزرهای دایودی دمش، کمباینر، محیط بهره Tm در بستر ZBLAN، شکافنده غلاف پمپ (CPS) و تعدیل کننده های میدان مدی (MFA) تشکیل شده است.



شکل ۱: طرحواره تقویت کننده فیبری تک-عبوری Tm:ZBLAN

لیزرهای دایودی دمش با توان بیشینه $0.4W$ در طول موج 1050 nm کار می کنند و باریکه سیگنال با توان ورودی $0.1W$ در طول موج 1460 nm را در فیبر فعال به طول 25 m تقویت می کنند. همچنین، اثرات نویز ASE در خط های 800 nm و 1800 nm در نظر گرفته شده است.

شکل (۲)، نمودار ترازهای انرژی یون های Tm^{+3} در شیشه فلوراید را نشان می دهد. جمعیت ترازهای 3H_6 ، 3F_4 ، 3H_5 ، 3F_2 ، 3H_4 و 3F_2 به ترتیب با N_0 ، N_1 ، N_2 ، N_3 ، N_4 و N_5 نشان داده می شوند. همچنین، در مدل معادلات نرخ، ترازهای 3F_2 و 3F_2 به دلیل نزدیکی فاصله، یک تراز ($^3F_{2,3}$) در نظر گرفته شده اند.



شکل ۲: مکانیسم دمش TDFA در 1050 nm (الف) جذب دمش و (ب) گسیل سیگنال و ASE [۶]

مقدمه

امروزه، تقویت کننده های فیبری بر پایه تولیم (TDFA) در ناحیه طول موجی مادون قرمز به دلیل کاربردهای چشمگیر در مخابرات نوری، مسافت یابی، سنجش از راه دور و زیست پزشکی بسیار مورد توجه اند. همچنین، آلاینده تولیم در 1470 nm می تواند برای تقویت باند-S مخابراتی ($1460-1520\text{ nm}$) بسیار کاربردی باشد [۱].

فیبرهای مختلفی مانند سیلیکای استاندارد [۲، ۳] و شیشه فلوراید (ZBLAN) [۴، ۵] به عنوان ماده میزبان برای آلاینده تولیم مورد استفاده قرار می گیرند. فیبرهای پایه فلوراید در مقایسه با فیبرهای سیلیکا انرژی فونونی پایین تری دارند و در نتیجه، بازده کوانتومی بالایی را در گذارهای لیزری تولیم ایجاد می کنند و نیز سبب کاهش احتمال واهلش متقاطع چند فونونی می شوند. در نتیجه، توان خروجی و بازده کوانتومی لیزرهای فیبری سیلیکا Tm^{+3} کاملاً محدود است.

روش های مختلفی که برای فیلتر کردن ASE ناخواسته بر روی فیبر آلاینده پیشنهاد شده است شامل؛ توری های فیبری با دوره تناوب زیاد نوسانات، قطر میدان مدی (MFD) بزرگ تر، تلفات خمش و فیلتر گاف باند می باشند. عملکرد این فیلتر برای فرونشانی گسیل خودبهبود تقویت شده (ASE) در مناطق طول موج های 800 nm و 1800 nm است و بنابراین عملکرد تقویت کننده را در ناحیه باند-S بهبود می بخشد.

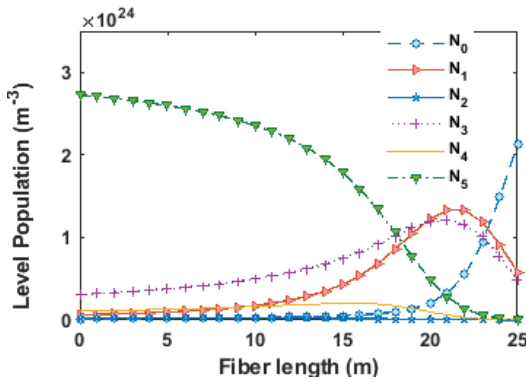
در این مقاله، یک مدل نظری برای طراحی لیزر فیبری آلاینده به Tm در بستر ZBLAN تک-عبوری ارائه شده است که در آن، اثر نویز گسیل خود به خودی تقویت شده (ASE)، برای دو خط 800 nm و 1800 nm در نظر گرفته شده است تا شرایط بهینه عملکرد تقویت کننده در ناحیه باند-S مخابراتی به دست آید.

غیرتابشی به ترتیب با $A_{۴۳nr}$ و $A_{۲۱nr}$ تعریف می‌شود. A_{ij} نرخ تابش از تراز i به تراز j شعاع ناحیه آلاینده است.

بحث و نتیجه‌گیری

برای دستیابی به بهترین عملکرد سیستم‌های کاربردی، لازم است ویژگی‌های تقویت‌کننده‌ها با استفاده از مدل‌سازی نظری و شبیه‌سازی بهینه شوند. در اینجا، از روش رانگ کوتای مرتبه ۴ برای حل معادلات دیفرانسیل خطی مرتبه اول، (۱۱)-(۱)، استفاده شده است.

شکل (۳)، تغییرات جمعیت ترازهای مختلف انرژی در طول فیبر محیط فعال را نشان می‌دهد. مطابق شکل، توزیع جمعیت در ترازهای ۲ و ۴ تقریباً صفر است. در ابتدای فیبر که محل تزریق توان دمش است، بیشتر اتم‌ها در تراز تحریکی ۵ قرار داند در حالی که در نقطه پایانی فیبر، جمعیت تراز زمینه بیشتر است.



شکل ۳: توزیع جمعیت ترازهای مختلف انرژی در یون‌های Tm در طول فیبر فعال

شکل (۴)، توزیع توان‌های دمش، سیگنال و ASE کل در طول تقویت‌کننده تک-عبوری آلاینده به Tm را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش طول بهره، توان دمش کاهش و توان سیگنال به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، تغییرات توان ASE ناچیز است. همچنین، طول بهینه با در نظر گرفته کمینه ASE در حدود m ۲۰ تخمین زده شده است که با شکل ۵ در توافق است.

با توجه به شکل (۲)، تغییرات جمعیت ترازها در سیستم ۶- تراز یون‌های Tm سه ظرفیتی به صورت زیر است [۶]:

$$\frac{dN_0}{dt} = -(W_{p02} + W_{18a} + W_{8a})N_0 + (A_{10} + W_{18c})N_1 + (A_{30} + W_{8c})N_3 + A_{50}N_5 \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = (W_{18a})N_0 - (A_{10} + W_{p14} + W_{sa} + W_{18c})N_1 + (A_{20})N_2 + A_{se}N_3 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (W_{p02})N_0 + (A_{21}^{nr})N_2 + (W_{52})N_5 \quad (3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = (W_{8a})N_0 + (W_{sa})N_1 - (A_{30} + W_{p35} + W_{se} + W_{8a})N_3 + (A_{43})N_4 \quad (4)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = (W_{p14})N_1 - (A_{43}^{nr})N_4 \quad (4)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = (W_{p35})N_3 - (A_{50} + A_{52})N_5 \quad (5)$$

$$\sum_i N_i = \rho = \frac{2}{b^2} \int_0^\infty n(r) r dr \quad (6)$$

به علاوه، معادلات آهنگ برای دمش ناهمسو با در نظر گرفتن اثر نویز ASE در حالت پایا به صورت زیر است [۸]:

$$\frac{dP_p^+}{dz} = -\Gamma(\lambda_p)(\sigma_{p02}N_0 + \sigma_{p14}N_1 + \sigma_{p02}N_3)P_p^+ - \alpha P_p^+ \quad (7)$$

$$\frac{dP_s^+}{dz} = +\Gamma(\lambda_s)(\sigma_{se}N_3 - \sigma_{sa}N_1 - \sigma_{p01}N_0)P_s^+ + \alpha P_s^+ \quad (8)$$

$$\frac{dP_{ASE}^\pm}{dz} = \pm\Gamma(\lambda_{ASE})(\sigma_{se}N_3 - \sigma_{se}N_1 + \sigma_{p01}N_0)P_{ASE}^\pm \quad (9)$$

$$\pm\Gamma(\lambda_{ASE})2h\nu\Delta\nu\sigma_{se}N_3 \mp \alpha P_{ASE}^\pm$$

$$\frac{dP_{ASE}^{8\pm}}{dz} = \pm\Gamma(\lambda_8)(\sigma_{30}N_3 - \sigma_{03}N_1)P_{ASE}^{8\pm} \quad (10)$$

$$\pm\Gamma(\lambda_8)2h\nu\Delta\nu\sigma_{30}N_3 \mp \alpha P_{ASE}^{8\pm}$$

$$\frac{dP_{ASE}^{18\pm}}{dz} = \pm\Gamma(\lambda_{18})(\sigma_{10}N_{13} - \sigma_{01}N_0)P_{ASE}^{18\pm} \quad (11)$$

$$\pm\Gamma(\lambda_{18})2h\nu\Delta\nu\sigma_{10}N_1 \mp \alpha P_{ASE}^{18\pm}$$

در این معادلات، W_{p02} ، W_{p014} و W_{p35} نرخ گذار طول موج 1050 nm پمپاست. جذب و گسیل القایی سیگنال به ترتیب توسط W_{sa} و W_{se} توصیف می‌شوند. نرخ ASE در 800 nm و 1800 nm به ترتیب با W_{18} و W_{18} و نرخگذار

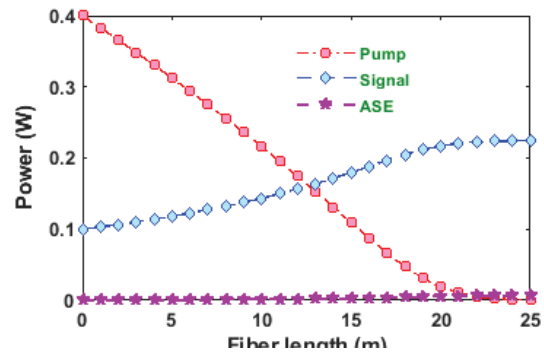
در انتها، رفتار منحنی بهره (dB) gain در طول فیبر در شکل (۶) مورد بررسی قرار گرفته است. با تقویت سیگنال به 0.1 W و به کارگیری توان دمش 0.4 W می‌توان به بیشینه بهره حدود 3.5 dB دست یافت. همچنین، رفتار غیرخطی منحنی بهره از رفتار سیگنال تقویت تبعیت می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تقویت‌کننده فیبری تک-عبوری Tm در محیط ZBLAN مورد بررسی قرار گرفته است. به کمک معادلات آهنگ به همراه اثر نویز ناخواسته ASE، شرایط عملکرد بهینه تقویت‌کننده به منظور استفاده در باند-S مخابرات نوری به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که در این تقویت‌کننده، سیگنال ورودی 0.1 W تا توان بیشینه 0.22 W با بهره 3.5 dB تقویت می‌شود و طول بهینه حدود 22 m برآورد شده است.

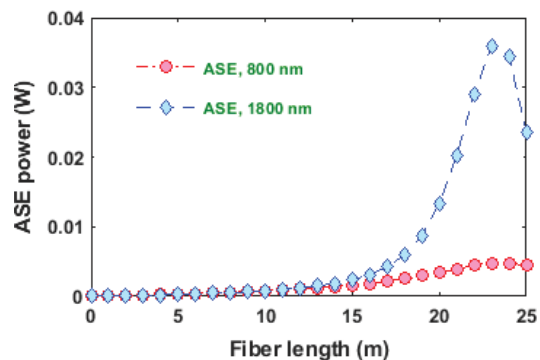
مرجع‌ها

- [1] B. Samson, et al., "Thulium-doped silicate fiber amplifier at 1460-1520 nm," in *Optical Amplifiers and Their Applications*, 2000, p. OTuD6.
- [2] P. Peterka, et al., "Theoretical modeling of fiber laser at 810 nm based on thulium-doped silica fibers with enhanced $3H_4$ level lifetime," *Optics express*, vol. 19, pp. 2773-2781, 2011.
- [3] Z. Li, et al., "90 nm gain extension towards $1.7 \mu\text{m}$ for diode-pumped silica-based thulium-doped fiber amplifiers," in *2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2014, pp. 1-3.
- [4] Y. Nomura and T. Fuji, "Ultrafast Thulium-Doped ZBLAN Fiber Amplifier Utilizing Nonlinear Spectral Broadening," in *Advanced Solid State Lasers*, 2017, p. JTh2A. 47.
- [5] K. Kohno, et al., "1 W single-frequency Tm-doped ZBLAN fiber MOPA around 810 nm," *Optics Letters*, vol. 39, pp. 2191-2193, 2014.
- [6] Emami S. D., et al., "Optimization of the 1050nm Pump Power and Fiber Length in Single-pass and Double-pass Thulium Doped Fiber Amplifier" *Progress in Electromagnetics Research C*, MIT Press, PIER14, pp. 431448, 2009.

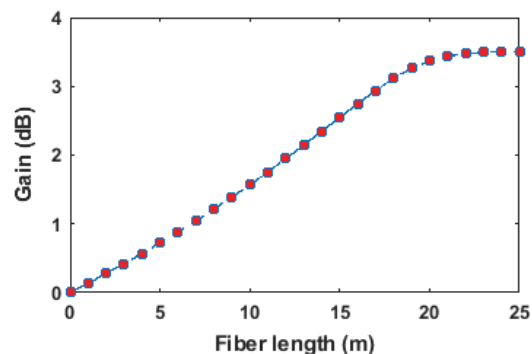


شکل ۴: توزیع توان‌های دمش، سیگنال و ASE در طول فیبر فعال

توزیع توان ASE در طول فیبر برای طول‌موج‌های 800 nm و 1800 nm در شکل (۵) آمده است. از آنجا که سیگنال لیزر از انتهای فیبر تزریق می‌شود، نویز ASE در جهت مخالف و از ابتدای فیبر شروع به افزایش کرده و در نقاط پایانی فیبر به بیشینه مقدار خود می‌رسد. مطابق شکل، اثر ASE در طول‌موج 1800 nm قوی‌تر از 800 nm است.



شکل ۵: توزیع توان ASE در خط‌های 800 nm و 1800 nm در طول فیبر فعال



شکل ۶: توزیع بهره (dB) Gain در طول فیبر فعال