

## با قابلیت Yb:Silica کننده فیبری طراحی یک سیستم نوین تشدیدگر - تقویت کنترل توان اپتیکی بر پایه شفافیت القای الکترومغناطیسی

ولی ورمزبازی<sup>۱</sup>، پرویز پروین<sup>۲</sup>، مریم ایلچی<sup>۳</sup>، نرگس شفیعی موسوی<sup>۳</sup>، حمیدرضا حبیبیان<sup>۲</sup> و حسن غفوری فرد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی برق، تهران

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه مهندسی فوتونیک، تهران

<sup>۳</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری کوانتومی، تهران

چکیده - در این مقاله، یک سیستم نوسانگر - تقویت کننده فیبری (MOFPA) موج پیوسته دو غلافه آلیایده شده به ایتربوم در بستر سیلیکا (Yb:silica) با قابلیت کنترل اپتیکی توان خروجی بر پایه اثر غیرخطی شفافیت القای الکترومغناطیسی (EIT) به صورت عددی مدل سازی شده است. برای این منظور، نانو کریستال های Si در موقعیت های مکانی خاصی در آینه کوپلاژ خروجی به میزبانی  $SiO_2$  آلیایده شده اند. با اعمال میدان پمپ کنترلی خارجی از طریق یک لیزر دیودی روی توری براگ (FBG) می توان ضریب شکست مواد EIT را تغییر داد که نتیجه آن، تغییر درصد بازتاب آینه خروجی (بین صفر تا ۱۰۰٪) و نیز دست یابی به یک سیستم اپتیکی تنظیم پذیر است.

کلید واژه- توری براگ، شفافیت القای الکترومغناطیسی، کوپلاژ خروجی، میدان کنترلی، نوسانگر - تقویت کننده فیبری

## Design of a Novel Power Controllable EIT-based FBG in Yb:silica Master Oscillator - Power Amplifier Fiber

Vali Varmazyari<sup>1</sup>, Parviz Parvin<sup>2</sup>, Maryam Eilchi<sup>3</sup>, Narges Shafii Mousavi<sup>2</sup>, Hamidreza Habibiyani<sup>2</sup>, and Hassan Ghafoorifard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran

<sup>2</sup>Photonic Engineering Group, Department of Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran

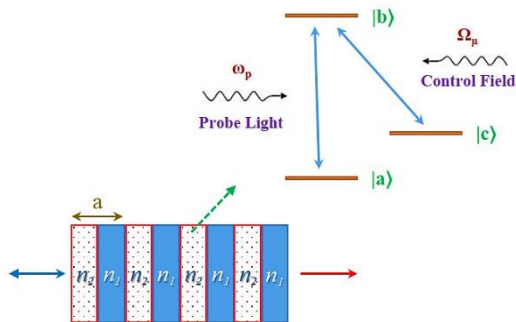
<sup>3</sup>Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute

Abstract- In this paper, an optically-controllable continuous-wave single-mode double-clad ytterbium (Yb) doped silica based on the nonlinear electromagnetically induced transparency (EIT) is numerically modeled on a master-oscillator fiber power-amplifier (MOFPA). Here, the Si nanocrystals are embedded in  $SiO_2$  host over selected regions of the output coupler. By applying the external control pump field through a diode laser on the fiber Bragg grating (FBG) can be change the refractive index of the EIT material, which results in a change the percentage of the reflection of the output mirror (between zero and 100%), as well as the achievement of one Optical system is adjustable.

Keywords: Control field, Electromagnetically induced transparency, Fiber Bragg grating, Master Oscillator Fiber Power Amplifier, Output coupler

## ۱- مقدمه

EIT آلائیده می‌شوند. ضریب شکست ناحیه EIT در توری براگ با تغییر دامنه میدان کنترلی مدوله می‌شود. EIT- این پدیده بر پایه تداخل مخرب کوانتومی بین دو حالت برانگیخته در اتم‌های سه یا چهار تراز و میدان نوری بیرونی است. به طور کلی، در این اثر دو لیزر به نام‌های کنترل و پروب با حالت‌های کوانتومی در تعامل است. شکل ۲، طرح‌واره سیستم سه ترازه نوع  $\Lambda$  [۳] را نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی از این مدل استفاده شده است. حالت کوانتومی (a) و (b) دو حالت پایه اتمی و (c) تراز برانگیخته است. گذارهای (ab) و (bc) امکان‌پذیر و گذار (ac) ممنوع است. در غیاب میدان کنترلی، میدان پروب جذب می‌شود و با حضور میدان کنترلی، پنجره طیفی شفافیتی در فرکانس معین گذار (bc) ایجاد می‌شود.



شکل ۲: طرحی از FBG-EIT در سیستم اتمی سه ترازه نوع  $\Lambda$  قسمت حقیقی و موهومی ضریب پذیرفتاری خطی  $\chi$  در گذار فرکانسی (ab) به صورت زیر بیان می‌شود که مربوط به پراکندگی و جذب در محیط است [۴]:

$$\text{Re}(\chi) = \frac{N_a \phi_{ab}^2 \Delta}{\epsilon_0 \hbar Z} \times \left[ \gamma_{ca} (\gamma_{ab} + \gamma_{ca}) + \left( \Delta^2 - \gamma_{ab} \gamma_{ca} - \frac{\Omega_{\mu}^2}{4} \right) \right] \quad (1)$$

$$\text{Im}(\chi) = \frac{N_a \phi_{ab}^2}{\epsilon_0 \hbar Z} \times \left[ \Delta^2 (\gamma_{ab} + \gamma_{ca}) - \gamma_{ca} \left( \Delta^2 - \gamma_{ab} \gamma_{ca} - \frac{\Omega_{\mu}^2}{4} \right) \right] \quad (2)$$

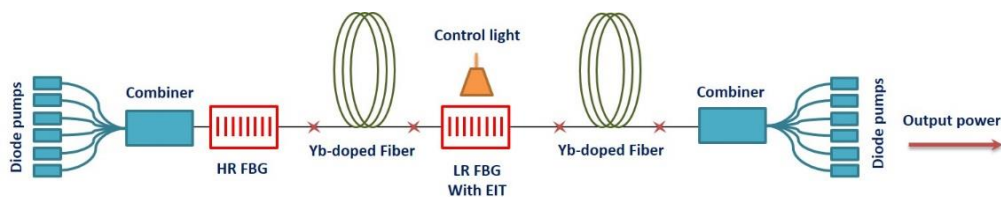
$$Z = \left( \Delta^2 - \gamma_{ab} - \gamma_{ca} - \frac{\Omega_{\mu}^2}{4} \right) + \Delta^2 (\gamma_{ab} + \gamma_{ca}) \quad (3)$$

که در آن، پارامترهای  $N_a$ ،  $\phi_{ij}$ ،  $\gamma_{ij}$  و  $\epsilon_0$  به ترتیب چگالی

امروزه لیزرهای فیبر نوری آلائیده به عنصر خاکی نادر در کاربردهای متنوع پزشکی، صنعتی و مخبرات نوری استفاده می‌شوند. در همین راستا، آرایه‌های MOFPA<sup>۱</sup> به دلیل کیفیت پرتو عالی، کنترل حرارتی مطلوب، راندمان بالا، واگرایی کم، پهنای خط باریک و همدوسی بالا مورد توجه‌اند. این لیزرها از تارهای دوغلافی چند مدی تشکیل شده‌اند که هسته آلائیده تک مد را در بر می‌گیرند. در دو انتهای تار، دو بازتابنده براگ قرار گرفته و سیستم توسط لیزرهای دیودی، از یکی از دو انتها یا هر دو دمیده می‌شود. نوآوری اصلی در این مقاله، کنترل توان خروجی لیزر فیبری با استفاده از تنظیم توری براگ کوپلاژ خروجی با میدان نور کنترلی است. برای این منظور، بخش‌های خاصی از توری براگ کوپلاژ خروجی به میزبانی SiO<sub>2</sub> با نانو کریستال‌های غیرخطی Si آلائیده می‌شوند. طراحی FBG تنظیم‌پذیر و نیز کنترل خروجی لیزر با بهینه‌سازی پارامترهایی مانند تعداد لایه‌های توری، چگالی نانوکریستال‌های EIT<sup>۲</sup> و توان میدان کنترلی انجام می‌شود [۲-۱].

## ۲- تئوری

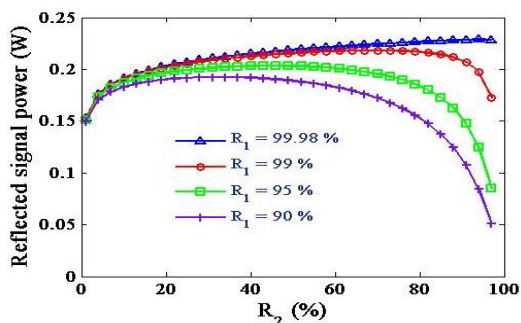
-آرایه MOFPA: شکل ۱ طرح‌واره سیستم MOFPA بر پایه FBG-EIT با قابلیت کنترل اپتیکی را نشان می‌دهد. لیزر اصلی شامل فیبر دو غلافه Yb:Silica است که بین دو جفت توری براگ با ضریب شکست پایین (L) و ضریب شکست بالا (H) قرار دارد تا کاواک فابری-پرو را تشکیل دهد. فیبر فعال تک مد با غلظت آلائیده  $1/2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$  ایتربوم در محیط بهره، قطر هسته-غلاف  $6-125 \mu\text{m}$  و گشودگی عددی (NA)  $0.15-0.46$  است. پمپ دیودی تزویج شده به فیبر استاندارد با توان خروجی  $800 \text{ mW}$  به وسیله ترکیب‌گر  $975-1082 \text{ nm}$  متصل می‌شود. در لایه‌های ضریب شکست پایین توری، نانو کریستال‌های



شکل ۱: نمایی از MOFPA بر مبنای FBG-EIT  
۱۵۸

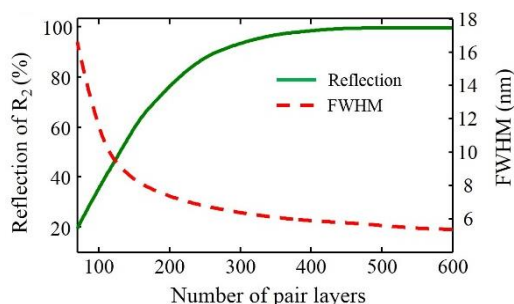
<sup>1</sup> Master-Oscillator Fiber Power-Amplifier

<sup>2</sup> Electromagnetically Induced Transparency



شکل ۱: توان سیگنال بازتابی برحسب انعکاس کوپلاژ خروجی حال، می‌توانیم تعداد لایه‌های FBG، غلظت آلاینده EIT و توان پمپ کنترلی مورد نیاز برای طراحی توری براگ کوک‌پذیر با درصد بازتاب دلخواه را تخمین بزنیم. شبیه‌سازی‌های مربوط به FBGها توسط نرم‌افزار Rsoft صورت گرفته که بر پایه تئوری مد-کوپل شده عمل می‌کند [۵].

شکل ۴ درصد بازتاب آینه خروجی و FWHM سیگنال لیزر را بر حسب تعداد لایه‌های توری براگ نشان می‌دهد. مطابق شکل، بازتاب ۹۰٪ به کمک ۲۷۰ جفت لایه FBG به دست می‌آید که پهنای باند باریکه خروجی لیزر ۶/۶ nm خواهد بود.



شکل ۲: انعکاس و FWHM برحسب تعداد لایه‌های انعکاس دهنده شکل ۵، (الف)، تغییرات ضریب شکست و درصد بازتاب کوپلاژ خروجی را بر حسب تابعی از میدان کنترلی نشان می‌دهد. به این ترتیب، با افزایش توان پمپ کنترلی از ۱/۴۴۱۵ mW تا ۱۰۰ mW، ضریب شکست مناطق EIT از ۱/۴۵۲۵ تا تنظیم‌پذیر با بازتاب ۹۶٪ تا ۴٪ داشت. در قسمت (ب)، با افزایش توان پمپ کنترلی، قله طول موج سیگنال از ۱۰۸۱/۵ nm تا ۱۰۸۵/۸ nm افزایش می‌یابد (جابه‌جایی قرمز). در حالی که، FWHM به عکس از ۷/۸ nm تا ۳/۶ nm کاهش می‌یابد.

تغییرات ضریب شکست توری براگ با بازتاب پایین  $n_2$  بر حسب توان کنترلی برای غلظت‌های مختلف نانو کریستال

نانوکریستال، المان ماتریس ممان دوقطبی، آهنگ واپاشی تابشی بین گذار تراز  $|i\rangle$  و  $|j\rangle$  و گذردهی الکتریکی می‌باشند. همچنین،  $\Omega_\mu$ ،  $\omega_p$  و  $\omega_{ab}$  به ترتیب فرکانس رابی، فرکانس میدان کنترلی و فرکانس میدان پروب معادل گذار  $|ab\rangle$  را نشان می‌دهند و  $\Delta = \omega_{ab} - \omega_p$  است. از سوی دیگر، تغییرات ضریب شکست  $(\delta n)$  و ضریب جذب  $(\alpha)$  به شکل زیر است:

$$\delta n = \frac{n}{2} \text{Re}(\chi) \quad , \quad \alpha = \frac{k}{2} \text{Im}(\chi) \quad (۴)$$

که  $n$  ضریب شکست EIT در طول موج پروب و  $k$  عدد موج را نشان می‌دهد. فرکانس رابی برحسب دامنه میدان کنترلی  $\epsilon_\mu$  و اندازه میدان کنترلی  $P$  عبارت است از:

$$\Omega_\mu = \frac{\epsilon_{bc} \epsilon_\mu}{\hbar} \quad , \quad P = \frac{1}{2} c n \epsilon_0 \epsilon_\mu^2 A_{\text{eff}} \quad (۵)$$

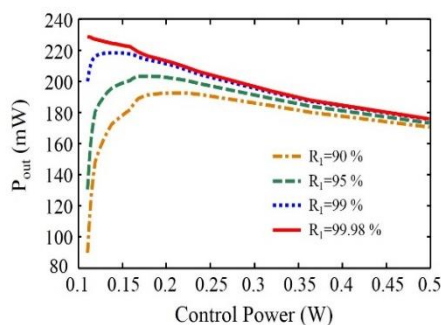
که کمیت‌های  $c$ ،  $A_{\text{eff}}$  و  $h$  به ترتیب نشان‌دهنده سرعت نور در خلاء، سطح مقطع جذب مؤثر و ثابت پلانک هستند. توری براگ برپایه EIT، در طول موج سیگنال جذب پایینی دارد. بنابراین، توان جذب صفر در نظر گرفته می‌شود ( $A \approx 0$ ). در تشدیدگر لیزر فیبری نامتقارن، ضرایب انعکاس ( $R_1$  و  $R_2$ ) متفاوت هستند و توان سیگنال خروجی ( $P_{\text{out}}$ ) به صورت تابعی از بهره سیگنال کوچک ( $\gamma_0$ ) و توان اشباع ( $P_{\text{sat}}$ ) محیط برابر است با:

$$P_{\text{out}} = \frac{\sqrt{R_1(1-R_2)} P_{\text{sat}}}{\sqrt{R_1(1-R_2)} + \sqrt{R_2(1-R_1)}} \left[ \gamma_0 L + \ln(\sqrt{R_1 R_2}) \right] \quad (۶)$$

به این ترتیب، بر مبنای پاسخ غیرخطی نور پروب در حضور میدان پمپ کنترلی، شرایط EIT را برای آینه کوپلاژ خروجی در لیزر فیبری ایجاد می‌کنیم.

### ۳- نتایج

ابتدا، بازده آینه کوپلاژ خروجی به منظور دستیابی به شرایط بهینه خروجی لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳، توان سیگنال بازتابی از آینه کوپلاژ خروجی در  $R_1$ های متفاوت برای حالتی که  $A \approx 0$  است را نشان می‌دهد. با تغییر  $R_1$  از ۹۰٪ تا ۹۹/۹۸٪، بیشینه توان خروجی لیزر به ازای عبور ۴٪ از کوپلاژ خروجی به دست می‌آید. زمانی که ضرایب  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب برابر ۹۶٪ و ۹۹/۹۸٪ هستند، توری براگ با ضریب بازتاب کم ناگهان به صورت یک محیط کدر عمل می‌کند.



شکل ۵: توان لیزر بر حسب میدان کنترلی برای  $R_1$  های متفاوت

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، توان خروجی، طول موج مرکزی و پهنای باند سیستم فیبری Yb:Silica در آرایش MOFPA با تغییر توان میدان پمپ کنترلی خارجی تنظیم شده است. این روش، با تکیه بر خاصیت غیرخطی نانو کریستال های EIT در توری براگ کوپلاژ خروجی اجرا شده است. با اعمال میدان نوری مطلوب، ضریب شکست توری براگ مبتنی بر EIT تغییر می کند و به این ترتیب، ضریب بازتاب آینه خروجی قابل کنترل است.

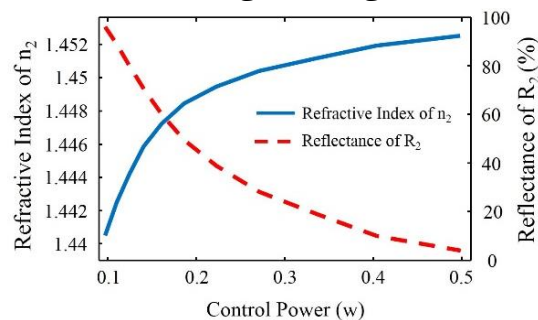
برای این منظور، اثر پارامترهای مخالف مانند تعداد جفت لایه ها و طول توری براگ، چگالی مواد آلاینده، تغییرات ضریب شکست و توان میدان کنترلی بر خروجی FBG-EIT در آینه کوپلاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۵- مراجع

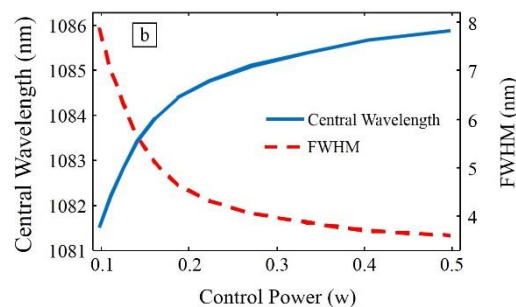
- [1] S. E. Harris, "Electromagnetically induced transparency," *Phys. Today*, vol. 50, 1997.
- [2] K. Imakita, M. Ito, M. Fujii, and S. Hayashi, "Nonlinear optical properties of Si nanocrystals embedded in SiO<sub>2</sub> prepared by a cosputtering method," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, pp. 3531-3535, 2009.
- [3] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J. P. Marangos, "Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media," *Reviews of modern physics*, vol. 77, p. 633, 2005.
- [4] M. Scully, "MS Zubairy Quantum Optics," *Cambridge Press, London*, 1997.
- [5] A. Othonos K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing" *Artech House Print on Demand*, 1999.
- [6] V. Varmazyari, H. Habibyan, and H. Ghafoorifard, "All-optical tunable slow light achievement in photonic crystal coupled-cavity waveguides," *Applied optics*, vol. 52, pp. 6497-6505, 2013.

EIT زمانی که  $n_1=1.4537$  است در شکل ۶ رسم شده است. مطابق شکل، هرچه غلظت آلاینده بیشتر باشد، تغییرات ضریب شکست بزرگ تری را شاهد هستیم.

شکل ۷، توان خروجی آرایه MOFPA بر حسب توان کنترلی برای  $R_1$  های متفاوت را نشان می دهد. بیشینه توان خروجی لیزر در انعکاس بالاتر (۹۹.۹۸٪) با اعمال کمترین مقدار میدان کنترلی به دست می آید.

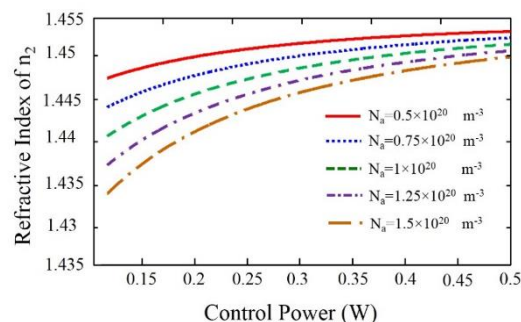


(الف)



(ب)

شکل ۳: (الف) تغییر ضریب شکست و بازتاب کوپلاژ خروجی (ب) تغییرات طول موج و FWHM بر حسب توان پمپ کنترلی اعمالی



شکل ۴: تغییرات  $n_2$  به عنوان تابع میدان کنترلی برای  $N_a$  های مختلف در  $n_1=1.4537$