با قابلیت Yb:Silicaکننده فیبری طراحی یک سیستم نوین تشدیدگر – تقویت کنترل توان اپتیکی بر پایه شفافیت القای الکترومغناطیسی

ولی ورمزیاری[۱]، پرویز پروین[۲]، مریم ایلچی[۳]، نرگس شفیعی موسوی[۲]، حمیدرضا حبیبیان[۲] و حسن غفوری‌فرد[۱]

[۱]دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی برق، تهران

[۲]دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه مهندسی فوتونیک، تهران

[۳]پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری کوانتومی، تهران

چکیده – در این مقاله، یک سیستم نوسانگر – تقویت‌کننده فیبری (*MOFPA*) موج پیوسته دو غلافه آلاییده شده به ایتربیوم در بستر سیلیکا (*Yb:silica*) با قابلیت کنترل اپتیکی توان خروجی بر پایه اثر غیرخطی شفافیت القای الکترومغناطیسی (*EIT*) به صورت عددی مدل‌سازی شده است. برای این منظور، نانو کریستال‌های *Si* در موقعیت‌های مکانی خاصی در آینه کوپلاژ خروجی به میزبانی SiO_2 آلاییده شده‌اند. با اعمال میدان پمپ کنترلی خارجی از طریق یک لیزر دیودی روی توری براگ (*FBG*) می‌توان ضریب شکست مواد *EIT* را تغییر داد که نتیجه آن، تغییر درصد بازتاب آینه خروجی (بین صفر تا ۱۰۰ ٪) و نیز دست‌یابی به یک سیستم اپتیکی تنظیم‌پذیر است.

کلید واژه- توری براگ ، شفافیت القایی الکترومغناطیسی، کوپلاژ خروجی، میدان کنترلی، نوسانگر– تقویت‌کننده فیبری

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

Vali Varmazyari[1], Parviz Parvin[2], Maryam Eilchi[3], Narges Shafii Mousavi[2], Hamidreza Habibiyan[2], and Hassan Ghafoorifard[1]

[1]Electerical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran
[2]Photonic Engineering Group, Department of Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran
[3]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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

امروزه لیزرهای فیبر نوری آلائیده به عنصر خاکی نادر در کاربردهای متنوع پزشکی، صنعتی و مخابرات نوری استفاده می‌شوند. در همین راستا، آرایه‌های MOFPA[1] 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.

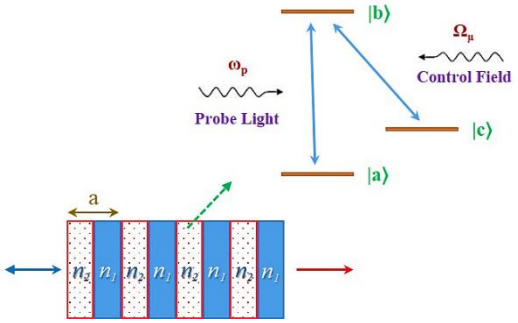
نوآوری اصلی در این مقاله، کنترل توان خروجی لیزر فیبری با استفاده از تنظیم توری براگ کوپلاژ خروجی با میدان نور کنترلی است. برای این منظور، بخش‌های خاصی از توری براگ کوپلاژ خروجی به میزبانی SiO_2 با نانو کریستال‌های غیرخطی Si آلاییده می‌شوند. طراحی FBG تنظیم‌پذیر و نیز کنترل خروجی لیزر با بهینه‌سازی پارامترهایی مانند تعداد لایه‌های توری، چگالی نانوکریستال‌های EIT[2] و توان میدان کنترلی انجام می‌شود [۱-۲].

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 آلایندگی $۱٫۲\times۱۰^{۲۶}\ m^{-۳}$ ایتربیوم در محیط بهره، قطر هسته-غلاف ۶-۱۲۵ µm و گشودگی عددی (NA) ۰٫۱۵-۰٫۴۶ است. پمپ دیودی تزویج شده به فیبر استاندارد با توان خروجی ۸۰۰ mW به وسیله ترکیب‌گر ۹۷۵-۱۰۸۲ nm متصل می‌شود. در لایه‌های ضریب شکست پایین توری، نانو کریستال‌های EIT آلاییده 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 ترازه 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 Λ [۳] را نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی از این مدل استفاده شده است. حالت کوانتومی $|a\rangle$ و $|b\rangle$ دو حالت پایه اتمی و $|c\rangle$ تراز برانگیخته است. گذارهای $|ab\rangle$ و $|bc\rangle$ امکان‌پذیر و گذار $|ac\rangle$ ممنوع است. در غیاب میدان کنترلی، میدان پروب جذب می‌شود و با حضور میدان کنترلی، پنجره طیفی شفافی در فرکانس معین گذار $|bc\rangle$ ایجاد می‌شود.



شکل ۲: طرحی از FBG-EIT در سیستم اتمی سه ترازه نوع Λ

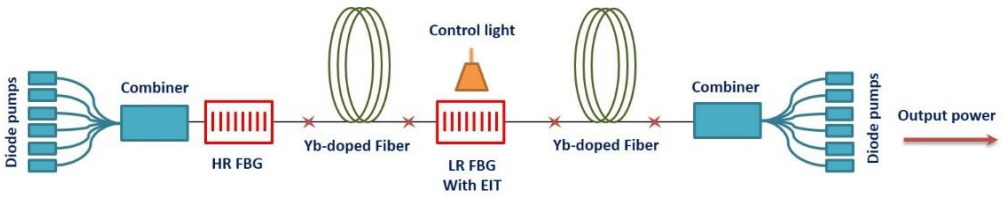
قسمت حقیقی و موهومی ضریب پذیرفتاری خطی χ در گذار فرکانسی $|ab\rangle$ به صورت زیر بیان می‌شود که مربوط به پراکندگی و جذب در محیط است [۴]:

$$\mathrm{Re}(\chi)=\frac{N_a\wp_{ab}^2\Delta}{\varepsilon_0\hbar Z}\times\left[\gamma_{ca}(\gamma_{ab}+\gamma_{ca})+\left(\Delta^2-\gamma_{ab}\gamma_{ca}-\frac{\Omega_\mu^2}{4}\right)\right] \quad (۱)$$

$$\mathrm{Im}(\chi)=\frac{N_a\wp_{ab}^2}{\varepsilon_0\hbar Z}\times\left[\Delta^2(\gamma_{ab}+\gamma_{ca})-\gamma_{ca}\left(\Delta^2-\gamma_{ab}\gamma_{ca}-\frac{\Omega_\mu^2}{4}\right)\right] \quad (۲)$$

$$Z=\left(\Delta^2-\gamma_{ab}-\gamma_{ca}-\frac{\Omega_\mu^2}{4}\right)+\Delta^2(\gamma_{ab}+\gamma_{ca}) \quad (۳)$$

که در آن، پارامترهای N_a، $\wp_{ij}$، γ_{ij} و ε_0 به ترتیب چگالی



شکل ۱: نمایی از MOFPA بر مبنای FBG-EIT

[1] Master-Oscillator Fiber Power-Amplifier [2] Electromagnetically Induced Transparency

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

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

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

که n ضریب شکست EIT در طول موج پروب و k عدد موج را نشان می‌دهد. فرکانس رابی برحسب دامنه میدان کنترلی ε_μ و اندازه میدان کنترلی P [۶] عبارت است از:

$$\Omega_\mu = \frac{\wp_{bc}\varepsilon_\mu}{\hbar} \quad , \quad P = \frac{1}{2}cn\varepsilon_0\varepsilon_\mu^2 A_{eff} \qquad (۵)$$

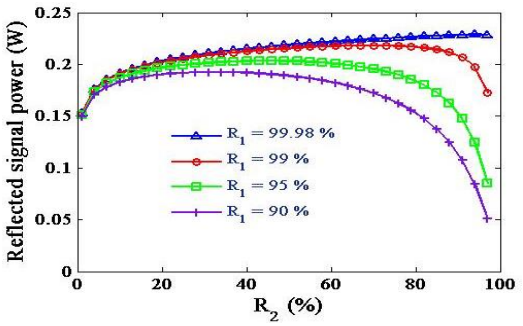
که کمیت‌های c، A_{eff} ، h به ترتیب نشان‌دهنده سرعت نور در خلاء، سطح‌مقطع جذب مؤثر و ثابت پلانک هستند. توری براگ برپایه EIT، در طول‌موج سیگنال جذب پایینی دارد. بنابراین، توان جذب صفر در نظر گرفته می‌شود ($A\approx 0$). در تشدیدگر لیزر فیبری نامتقارن، ضرایب انعکاس (R_1 و R_2) متفاوت هستند و توان سیگنال خروجی (P_{out}) به صورت تابعی از بهره سیگنال کوچک (γ_0) و توان اشباع (P_{sat}) محیط برابر است با:

$$P_{out} = \frac{\sqrt{R_1}(1-R_2)P_{sat}}{\sqrt{R_1}(1-R_2)+\sqrt{R_2}(1-R_1)}\left[\gamma_0 L + \ln\left(\sqrt{R_1R_2}\right)\right] \qquad (۶)$$

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

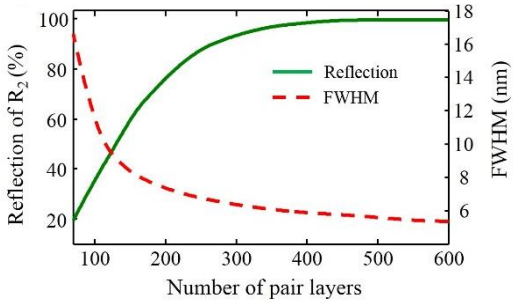
ابتدا، بازده آینه کوپلاژ خروجی به منظور دست‌یابی به شرایط بهینه خروجی لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳، توان سیگنال بازتابی از آینه کوپلاژ خروجی در R_1های متفاوت برای حالتی که $A\approx 0$ است را نشان می‌دهد. با تغییر R_1 از ۹۰ ٪ تا ۹۹٫۹۸ ٪، بیشینه توان خروجی لیزر به ازای عبور ۴ ٪ از کوپلاژ خروجی به دست می‌آید. زمانی که ضرایب R_2 و R_1 به ترتیب برابر ۹۶ ٪ و ۹۹٫۹۸ ٪ هستند، توری براگ با ضریب بازتاب کم ناگهان به صورت یک محیط کدر عمل می‌کند.



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-کوپل‌شده 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 mW ۱۰۰ تا mW ۵۰۰، ضریب شکست مناطق EIT از ۱٫۴۴۱۵ تا ۱٫۴۵۲۵ تغییر می‌کند و می‌توان یک توری براگ تنظیم‌پذیر با بازتاب ۹۶ ٪ تا ۴ ٪ داشت. در قسمت (ب)، با افزایش توان پمپ کنترلی، قله طول‌موج سیگنال از nm ۱۰۸۱٫۵ تا nm ۱۰۸۵٫۸ افزایش می‌یابد (جابه‌جایی قرمز). درحالی‌که، FWHM به عکس از nm ۷٫۸ تا nm ۳٫۶ کاهش می‌یابد.

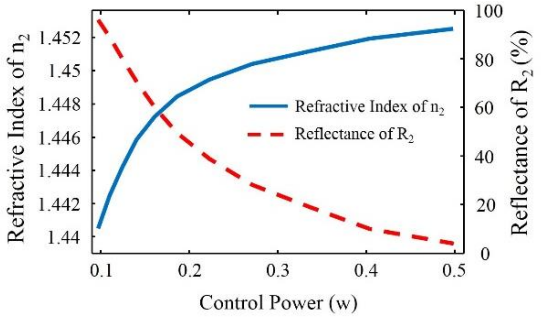
تغییرات ضریب شکست توری براگ با بازتاب پایین n_2 بر حسب توان کنترلی برای غلظت‌های مختلف نانو کریستال

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

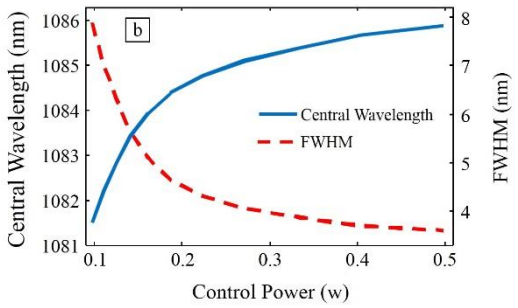
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

EIT زمانی که n_1=۱/۴۵۳۷ است در شکل ۶ رسم شده است. مطابق شکل، هرچه غلظت آلاینده بیشتر باشد، تغییرات ضریب شکست بزرگ‌تری را شاهد هستیم.

شکل ۷، توان خروجی آرایه MOFPA برحسب توان کنترلی برای R_1 های متفاوت را نشان می‌دهد. بیشینه توان خروجی لیزر در انعکاس بالاتر (۹۹/۹۸ ٪) با اعمال کمترین مقدار میدان کنترلی به دست می‌آید.

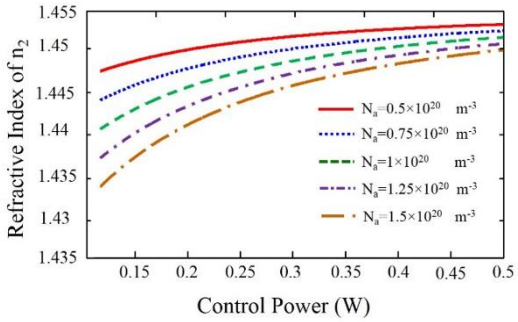


(الف)

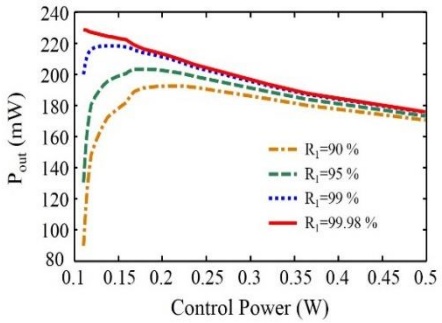


(ب)

شکل ۳: (الف) تغییر ضریب شکست و بازتاب کوپلاژ خروجی (ب) تغییرات طول‌موج و FWHM برحسب توان پمپ کنترلی اعمالی



شکل ۴: تغییرات n_2 به عنوان تابع میدان کنترلی برای N_a های مختلف در n_1=۱/۴۵۳۷



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

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، توان خروجی، طول‌موج 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 کریستال‌های EIT در توری براگ کوپلاژ خروجی اجرا شده است. با اعمال میدان نوری مطلوب، ضریب شکست توری براگ مبتنی بر EIT تغییر می‌کند و به این ترتیب، ضریب بازتاب آینه خروجی قابل کنترل است.

برای این منظور، اثر پارامترهای مخالف مانند تعداد جفت لایه‌ها 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 SiO2 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. Habibiyan, and H. Ghafoorifard, "All-optical tunable slow light achievement in photonic crystal coupled-cavity waveguides," *Applied optics*, vol. 52, pp. 6497-6505, 2013.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]