



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



## معرفی مدل آرایه بیضوی فیبرنوری برای طراحی لیزر قفل‌شدگی مد

سمیه شاکری<sup>(۱)</sup>، اکرم نیک‌نفس<sup>(۲)</sup>، علیرضا بهرامپور<sup>(۳)</sup>

(۱) و (۲) دانشگاه شهید باهنر، دانشکده فیزیک

(۳) دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده فیزیک

چکیده- کاربرد روزافزون آرایه‌های فیبرنوری در زمینه‌های مختلف، از جمله کاربردهای لیزری، سبب ارائه چیدمانهای مختلف برای این آرایه‌ها شده‌است. با توجه به کاربرد آرایه‌های موجبری در لیزر قفل‌شدگی مد، مدل آرایه بیضوی معرفی شده‌است که علاوه بر فیبرهای محیطی، دو فیبر نیز در کانون‌ها قرار دارد. با ورود پالس نور از یک کانون، خاصیت کوپل‌شدگی آرایه سبب انتقال آن به کانون دیگر شده و با در نظر گرفتن اثرهای غیرخطی می‌توان علاوه بر انتقال، پالس را نیز فشرده کرد. نشان داده شد این آرایه می‌تواند در لیزر قفل‌شدگی مد موثر بوده و هم‌چنین گزینه مناسبی برای تولید لیزر با توان بالا باشد.

کلیدواژه- اثرات غیرخطی، آرایه فیبرنوری، پالس فشرده شده، لیزر قفل‌شدگی مد

## Introduce Elliptical Waveguide Array for Design Mode-Locking Laser

Somayeh Shakeri<sup>(۱)</sup>, Akram Niknafs<sup>(۲)</sup>, Alireza Bahrampour<sup>(۳)</sup>

(۱), (۲) Shahid Bahonar University, Department of Physics

(۳) Sharif University, Department of Physics

**Abstract-** Increasing applications of waveguide arrays in various area, led to different models of arrays. The fiber arrays mode locking is one of the important subjects. Therefore, elliptical fiber array model introduced that in addition to the peripheral fibers, there exist two fibers in focus. The light is incident in one of the fiber in focus. It was shown that the array could be effective in laser mode locking and a good candidate for high power lasers.

**Keywords-** compressed pulse, laser mode locking, nonlinear effects, waveguide array

## ۱- مقدمه

با استفاده از تئوری کوپل‌شدگی مد در آرایه‌ها معادله حاکم بر این مدل به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$(1) i \frac{du_n}{dz} + C(u_{n+1} + u_{n-1}) + C_{n,N+1}u_{N+1} + C_{n,N+2}u_{N+2} = 0,$$

$$(2) i \frac{du_{N+1}}{dz} + \sum_1^N C_{n,N+1}u_n = 0,$$

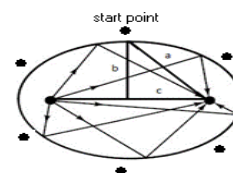
$$(3) i \frac{du_{N+2}}{dz} + \sum_1^N C_{n,N+2}u_n = 0.$$

در این معادلات  $u_n(z)$  دامنه میدان در فیبرها،  $C$  ضریب کوپل‌شدگی بین دو فیبر محیطی که در همسایگی هستند و  $C_{ni}$  ( $i = N+1, N+2$ ) ضریب کوپل‌شدگی بین فیبرهای محیطی و فیبرهای کانونی می‌باشند. ضرایب کوپل‌شدگی مطابق با مقاله مرجع [۳] محاسبه می‌شود و فرض می‌کنیم فاصله بین فیبرهای محیطی برابر باشد. نور لیزر ورودی می‌تواند از هر کدام از فیبرها وارد شود اما نشان می‌دهیم که اگر یکی از فیبرهای کانونی را به عنوان فیبر ورودی انتخاب کنیم، در یک طول معین نور در کانون دیگر جمع می‌شود و فیبرهای محیطی نقش واسطه انتقال را خواهند داشت. اگر یکی از فیبرهای محیطی را به عنوان فیبر ورودی انتخاب کنیم چنین اثری مشاهده نمی‌شود. قطرهای بزرگ و کوچک بیضی به ترتیب  $a = 10 \mu m$  و  $b = 8 \mu m$ ، تعداد فیبرهای محیطی  $N = 6$  و توان ورودی پمپ  $P = 1 \mu W$  در نظر گرفته شده است. با این مشخصات و با حل عددی معادله (۱) تا (۳) توزیع میدان در فیبرها به دست آمده است. شکل (۲) توزیع میدان را برای حالتی نشان می‌دهد که یکی از فیبرهای کانونی به عنوان فیبر ورودی است. در طول ۱۶mm نور در کانون خروجی جمع شده است. این طول را طول انتقال می‌نامیم. شکل (۳) توزیع میدان برای وقتی که فیبر شماره ۳ به عنوان ورودی انتخاب شده است را نشان می‌دهد. در این صورت نمی‌توان نور را در کانون‌ها متمرکز کرد. البته بایستی به این نکته توجه شود که جایگزیدگی نور در آرایه‌های فیبرنوری به طور دوره‌ای تکرار می‌شود. با پرش نور بین فیبرها بعد از ۱۶mm و، برای بار دوم نور در طول ۴۷mm دوباره در کانون خروجی جمع می‌شود. در قسمت بعد نشان می‌دهیم که آرایه مورد نظر می‌تواند در شرایطی خاص سبب فشردگی شدن پالس شود.

پدیده قفل‌شدگی مد اولین بار توسط مولر و همکارانش در سال ۱۹۶۳ برای لیزر یاقوت مطرح شد [۱]. این پدیده بر اساس عامل تولید به دو دسته تقسیم می‌شود: قفل‌شدگی مد فعال و قفل‌شدگی مد غیرفعال که با کمک مواد جاذب اشباع‌پذیر و یا عدسی کر بوجود می‌آید. یکی از روشهایی که اخیراً برای تولید قفل‌شدگی مد مورد توجه قرار گرفته است استفاده از خصوصیات غیرخطی آرایه‌های فیبر نوری است [۲]. آرایه‌های فیبر نوری می‌توانند به عنوان جاذب اشباع‌شونده عمل کرده و اثر قفل‌شدگی مد را ایجاد کنند. آرایه فیبرنوری از کنار هم قراردادن فیبرها در فاصله میکرومتری شکل می‌گیرد [۳] و در چیدمانهای متفاوت به شکل خطی، دایروی و چندضلعی مورد توجه قرار گرفته است. پالس ورودی در یک آرایه خطی که در آن فیبرها خاصیت غیر خطی دارند، با تغییرات شدت فشرده شده و دامنه آن در شدت معین ثابت می‌ماند. از این ویژگی برای طراحی لیزر قفل‌شدگی مد استفاده شده است [۲]. در این مقاله، در ابتدا مدل بیضوی از فیبر نوری معرفی می‌شود. در این آرایه علاوه بر فیبرهای محیطی دو فیبر نیز در کانون‌های بیضی قرار دارند. نور از یک کانون وارد شده و در یک طول معین در کانون دیگر جمع می‌شود و هم‌زمان با در نظر گرفتن آثار غیرخطی، می‌تواند یک پالس فشرده را انتقال دهد. نشان داده می‌شود این مدل بسیار موثرتر از آرایه خطی، گزینه مناسبی برای تولید لیزر قفل‌شدگی مد خواهد بود و با بهینه‌سازی می‌تواند برای تولید لیزرهای توان بالا مورد استفاده قرار گیرد.

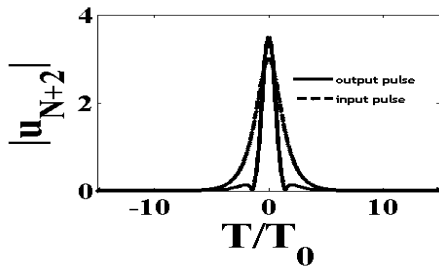
## ۲- توصیف مدل

آرایه مورد نظر این مقاله مطابق شکل (۱) بیضی‌وار است و شامل ۶ فیبر محیطی و دو فیبر در کانونها می‌باشد. هر فیبر روی محیط کانون می‌تواند با همسایه‌های مرتبه اول و هم‌چنین با فیبرهای کانونی در ارتباط باشد.



شکل (۱): آرایه بیضوی از فیبرهای کوپل شده.

در فیبرهای محیطی و در کانونها،  $\gamma$ ،  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  ضرایب غیر خطی به ترتیب در فیبرها و دوکانون هستند. شکل پالس ورودی  $A \operatorname{sech}(t/t_0)$  در نظر می‌گیریم.  $t_0$  پهناي اولیه و  $A$  دامنه پالس است. فرض می‌شود ضرایب پاشندگی در فیبرها  $25 \times 10^{-3} \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$ ، ضرایب غیرخطی در کانونها  $25 \times 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$  و در فیبرهای محیطی  $25 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$  می‌باشد.

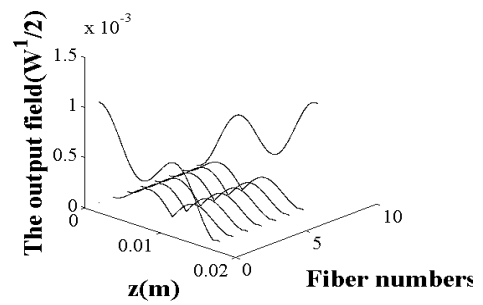


شکل ۴: پالس خروجی کانون خروجی در مقابل پالس ورودی فشرده شده است.

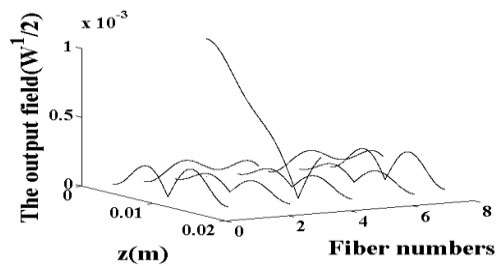
نتایج نشان می‌دهد از آنجایی که طول انتقال کوچک است و ضرایب غیرخطی را بزرگ در نظر گرفته‌ایم در این شرایط طول انتقال با حضور اثر SPM تغییر نمی‌کند و همچنان ۱۶mm خواهد بود. همچنین در شدتهای پایین پالس فشرده نشده اما در دامنه  $A = 3\sqrt{W}$  مطابق شکل (۴) پالس خروجی در کانون دوم فشرده شده است.

#### ۴- استفاده از آرایه های فیبرنوری در لیزر قفل شدگی مد

در مرجع [۲] کوتز و همکارانشان نشان داده‌اند که می‌توان از آرایه‌های موجبری در لیزر قفل شدگی مد استفاده کرد. براین اساس محیط فیبر کانونی خروجی را تقویت شده و بقیه فیبرها را بدون تقویت در نظر می‌گیریم. معادلات به شکل زیر تغییر می‌کنند:



شکل ۲: توزیع میدان در آرایه بیضوی با شش فیبر محیطی. فیبر شماره ۱ کانون ورودی و فیبر شماره ۸ کانون خروجی است. همانطور که نشان داده شده در طول ۱۶mm نور کاملاً در کانون خروجی جمع می‌شود.



شکل ۳: اگر فیبر ورودی یکی از فیبرهای محیطی باشد نمی‌توان نور را در کانونها متمرکز کرد.

#### ۳- فشرده‌گی پالس در آرایه فیبر نوری

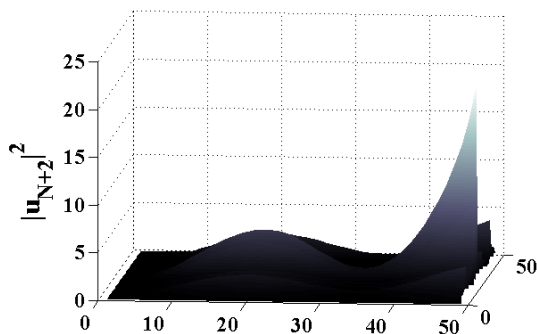
یکی از ویژگی آرایه های فیبرنوری، فشرده سازی پالس می‌باشد. این خاصیت در مرجع [۴] به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. در اینجا نشان می‌دهیم که آرایه بیضوی شکل نیز می‌تواند به عنوان یک فشرده ساز مورد بررسی قرار بگیرد. برای دستیابی به این هدف، فیبرها را با محیط غیرخطی در نظر می‌گیریم و در نتیجه اثر کر SPM و پاشندگی سرعت گروه GVD را نیز به معادلات اضافه می‌کنیم:

$$(4) i \frac{du_n}{dz} + C(u_{n+1} + u_{n-1}) + C_{n,N+1}u_{N+1} + C_{n,N+2}u_{N+2} + \beta_2 \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} + \gamma |u_n|^2 u_n = 0,$$

$$(5) i \frac{du_{N+1}}{dz} + \sum_1^N C_{n,N+1}u_n + \beta_{21} \frac{\partial^2 u_{N+1}}{\partial t^2} + \gamma_1 |u_{N+1}|^2 u_{N+1} = 0,$$

$$(6) i \frac{du_{N+2}}{dz} + \sum_1^N C_{n,N+2}u_n + \beta_{22} \frac{\partial^2 u_{N+2}}{\partial t^2} + \gamma_2 |u_{N+2}|^2 u_{N+2} = 0.$$

در این معادلات  $\beta_2$ ،  $\beta_{21}$  و  $\beta_{22}$  به ترتیب ضرایب پاشندگی



شکل ۵: انتشار پالس نویز سفید در کانون خروجی. در طول انتقال پالس کوتاه باتوان بالا تشکیل شده است.

### ۵- نتیجه گیری:

آرایه بیضوی شکل از فیبرهای نوری کوپل شده پیشنهاد شده است. این آرایه شامل فیبرهای محیطی و دو فیبر در کانون است. در این مقاله نشان داده شد که اگر پمپ را به یکی از کانون‌های وارد کنیم، نور در کانون دوم جمع می‌شود. با در نظر گرفتن آثار غیرخطی این مدل آرایه می‌تواند همزمان با انتقال نور سبب فشردگی پالس نیز شود. از این خصوصیت در لیزرهای قفل شدگی مد بهره می‌گیرند. همچنین این آرایه می‌تواند گزینه مناسبی برای تولید لیزرهای با توان بالا نیز باشد.

مراجع:

- [۱] K. Gürs and R. Müller, *Breitband-modulation durch Steuerung der Emission eines optischen masers (Auskopplemodulation)*, **Phys. Lett.**, ۵ (۱۹۶۳) ۱۷۹-۱۸۱.
- [۲] G. BaleB., Kutz J. N., Sandtete B., *Optimizing Waveguide Array Mode-Locking for High-Power Fiber laser*, **IEEE**, ۱۵ (۲۰۰۹) ۲۲۰-۲۳۱.
- [۳] Szameit A., Driesow F., Pertsch T., Nolte S., Tunnermann A., *Control of Directional Eranescent Coupling in fs Laser Written Waveguides*, **Optics Express**, ۱۵ (۲۰۰۷).
- [۴] Aceves A., G. Luther G., De Anjelic C., M. Ruenchik A., K. Turitsyn S., *Optical Pulse Compression Using Fiber Arrays*, **Optical Fiber Technology**, ۱ (۱۹۹۵) ۲۴۴-۲۴۶.

$$(7) i \frac{du_n}{dz} + C(u_{n+1} + u_{n-1}) + C_{n,N+1}u_{N+1}$$

$$+ C_{n,N+2}u_{N+2} + \beta_2 \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} + \gamma |u_n|^2 u_n$$

$$+ i\alpha u_n = 0,$$

$$(8) i \frac{du_{N+1}}{dz} + \sum_1^N C_{n,N+1}u_n + \beta_{21} \frac{\partial^2 u_{N+1}}{\partial t^2}$$

$$+ \gamma_1 |u_{N+1}|^2 u_{N+1} + i\alpha u_{N+1} = 0,$$

$$(9) i \frac{du_{N+2}}{dz} + \sum_1^N C_{n,N+2}u_n + \beta_{22} \frac{\partial^2 u_{N+2}}{\partial t^2}$$

$$+ \gamma_2 |u_{N+2}|^2 u_{N+2} + i\alpha u_{N+2}$$

$$- ig(z)(1 + \tau \frac{\partial^2}{\partial t^2})u_{N+2} = 0.$$

در این معادلات بهره از فرم استاندارد  $g(z) = 2g_0 / (1 + \frac{|u|^2}{e})$

تبعیت می‌کند که در آن  $g_0$  بهره سیگنال و  $e$  توان اشباع می‌باشد. پارامتر بدون بعد  $\tau$  پهنای طیف بهره را کنترل می‌کند و مقدار آن ۰٫۰۸ است [۲]. هدف از لیزر قفل شدگی مد دستیابی به پالس‌های بسیار کوتاه با پیک تیز و انرژی بالا است. بنابراین، ورودی نویز سفید انتخاب شده، طول

فیبر ۱۶mm، ضریب اتلاف فیبر  $\frac{dB}{Km} = 0.2$  و  $\alpha = 24.4$

است. نتیجه شبیه‌سازی از حل عددی معادلات در شکل (۵) نشان داده شده است. پالس بسیار تیز و فشرده در

خروجی کانون دوم شکل می‌گیرد و بنابراین می‌تواند همراه با انتقال کامل یک پالس فشرده باتوان بالا نیز به

دست آورد. در دور دوم جایگزینی یعنی در طول ۴۷mm دوباره این فرآیند تکرار می‌شود. این مدل می‌تواند برای

طراحی لیزرهای با توان بالا کارا باشد. در این صورت پیشنهاد می‌دهیم که در تمام فیبرها از موادی با بهره و

ضریب غیرخطی بالا استفاده شده و با بهینه‌سازی مدل می‌توان به لیزرهای توان بالا از مرتبه وات دست یافت. در

لیزرهای توان بالا که از چندین فیبر استفاده می‌کنند نیاز به طراحی ترکیب کننده‌ای است که خروجی تمام فیبرها

را در نهایت جمع کرده و یک پالس هم‌دوس تولید کند. طراحی این وسیله خود چالش دیگری محسوب می‌شود.

اما این مدل آرایه به دلیل ویژگی فیبرهای کوپل شده و جمع کردن تمام نور در یک کانون نیازی به ترکیب کننده

ندارد.