معرفی مدل آرایه بیضوی فیبرنوری برای طراحی لیزر قفل‌شدگی‌مد

سمیه شاکری[۱]، اکرم نیک نفس[۲]، علیرضا بهرامپور[۳]

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

(۳) دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده فیزیک

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

کلیدواژه- اثرات غیرخطی، آرایه فیبرنوری، پالس فشرده شده، لیزرقفل‌شدگی‌مد

Introduce Elliptical Waveguide Array for Design Mode-Locking Laser

Somayeh Shakeri[۱], Akram Niknafs[۲], Alireza Bahrampour[۳]

(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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

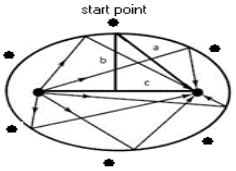
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پدیده قفل‌شدگی‌مد اولین‌بار توسط مولر و همکارانش در سال ۱۹۶۳برای لیزر یاقوت مطرح شد[۱]. این پدیده براساس عامل تولید به دو دسته تقسیم می‌شود: قفل شدگی 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 قفل‌شدگی‌مد مورد توجه قرارگرفته‌است استفاده از خصوصیات غیرخطی آرایه‌های فیبر نوری است[۲]. آرایه های فیبر نوری می‌توانند به عنوان جاذب اشباع‌شونده عمل کرده و اثر قفل‌شدگی‌مد را ایجادکنند. آرایه فیبرنوری از کنارهم قراردادن فیبرها درفاصله میکرومتری شکل می‌گیرد [۳] و در چیدمانهای متفاوت به شکل خطی، دایروی و چندضلعی مورد توجه قرارگرفته‌است. 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 قفل‌شدگی‌مد 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 قراردارند. نور از یک کانون واردشده و در یک طول معین در کانون دیگر جمع‌می‌شود و هم‌زمان بادرنظرگرفتن آثار غیرخطی، می‌تواند یک پالس فشرده راانتقال دهد. نشان داده می‌شوداین مدل بسیار موثرتر از آرایه خطی, گزینه مناسبی برای تولید لیزرقفل شدگی‌مدخواهد بود و با بهینه‌سازی می تواند برای تولیدلیزرهای توان بالامورداستفاده قرار گیرد.

۲-توصیف مدل

آرایه موردنظر این مقاله مطابق شکل (۱) بیضی‌وار است و شامل ۶ فیبر محیطی و دو فبیر 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.

با استفاده از تئوری کوپل‌شدگی‌مد در آرایه ها معادله حاکم بر این مدل به شکل زیر نوشته می‌شود:

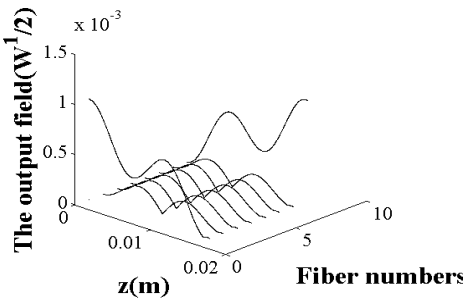
$$(1)i\frac{du_n}{dz}+C(u_{n+1}+u_{n-1})+C_{n,N+1}u_{N+1}+C_{n,N+2}u_{N+2}=0,$$

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

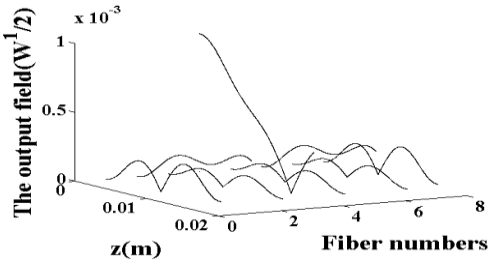
$$(3)i\frac{du_{N+2}}{dz}+\sum_{1}^{N}C_{n,N+2}u_n=0.$$

دراین معادلات $u_n(z)$ دامنه میدان درفیبرها, Cضریب کوپل‌شدگی بین دو فیبرمحیطی که درهمسایگی 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 برابرباشد. نور لیزر ورودی می‌تواند از هرکدام از فیبرها واردشود اما نشان می‌دهیم که اگر یکی از فیبرهای کانونی را به عنوان فیبر ورودی انتخاب کنیم، در یک طول معین نور درکانون دیگر جمع می‌شود و فیبرهای محیطی نقش واسطه انتقال را خواهند داشت. اگریکی از فیبرهای محیطی را به عنوان فیبرورودی 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 $N=6$ وتوان ورودی پمپ $P=1\mu W$ درنظرگرفته‌شده‌است. 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 میدهدکه یکی از فیبرهای کانونی به عنوان فیبر ورودی است. درطول ۱۶mm نور در کانون خروجی جمع شده‌است. این طول راطول انتقال می‌نامیم. شکل (۳) توزیع میدان برای وقتی که فیبر شماره ۳ به عنوان ورودی انتخاب شده است را نشان می‌دهد. در این صورت نمی-توان نور را در کانون‌ها متمرکز کرد. البته بایستی به این نکته توجه شود که جایگزیدگی نور در آرایه‌های فیبرنوری به طور دوره‌ای تکرارمی‌شود. با پرش نور بین فیبرها بعد از ۱۶mm و، برای باردوم نور در طول ۴۷mm دوباره در کانون خروجی جمع می‌شود. در قسمت بعد نشان‌می‌دهیم که آرایه موردنظر می‌تواند در شرایطی خاص سبب فشرده شدن پالس شود.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]



شکل۲:توزیع میدان درآرایه بیضوی با شش فیبرمحیطی. فیبر شماره۱ کانون ورودی و فیبرشماره ۸ کانون خروجی است. همانطورکه نشان داده شده درطول ۱۶mmنورکاملاً درکانون خروجی جمع می‌شود.



شکل۳: اگر فیبرورودی یکی از فیبرهای محیطی باشد نمی‌توان نور را در کانونها متمرکزکرد.

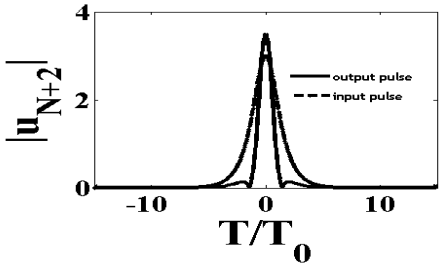
۳- فشردگی پالس در آرایه فیبر نوری

یکی از ویژگی آرایه های فیبرنوری, فشرده سازی پالس می‌باشد. این خاصیت در مرجع[۴] به تفضیل مورد بحث قرار گرفته است. دراینجا نشان می‌دهیم که آرایه بیضوی شکل نیز می‌تواند به عنوان یک فشرده ساز مورد بررسی قراربگیرد. برای دستیابی به این هدف, فیبرها را با محیط غیرخطی درنظرمی‌گیریم ودرنتیجه اثرکرSPM و پاشندگی سرعت گروه GVD را نیز به معادلات اضافه می‌کنیم:

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

$$(5)i\frac{du_{N+1}}{dz}+\sum_1^N C_{n,N+1}u_n+\beta_{21}\frac{\partial^2 u_{N+1}}{\partial t^2}$$
$$+\gamma_1|u_{N+1}|^2u_{N+1}=0,$$
$$(6)i\frac{du_{N+2}}{dz}+\sum_1^N C_{n,N+2}u_n+\beta_{22}\frac{\partial^2 u_{N+2}}{\partial t^2}$$
$$+\gamma_2|u_{N+2}|^2u_{N+2}=0.$$

دراین معادلات β_2 ، β_{21} و β_{22} به‌ترتیب ضرایب پاشندگی در فیبرهای محیطی و در کانونها، γ ، γ_1 و γ_2 ضرایب غیر خطی به ترتیب درفیبرها ودوکانون هستند. شکل پالس ورودی $A\sec h(t/t_0)$ درنظرمی‌گیریم. t_0 پهنای اولیه و A دامنه پالس است. فرض می‌شود ضرایب پاشندگی در فیبرها $25\times10^{-3}\,ps^2m^{-1}$، ضرایب غیرخطی درکانون‌ها $25\times10^{-2}W^{-1}m^{-1}$ و در فیبرهای محیطی $25\times10^{-3}W^{-1}m^{-1}$ می‌باشد.



شکل۴: پالس خروجی کانون خروجی در مقابل پالس ورودی فشرده شده‌است.

نتایج نشان میدهد از آنجایی که طول انتقال کوچک است و ضرایب غیرخطی را بزرگ درنظرنگرفته‌ایم 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 درکانون دوم فشرده شده است.

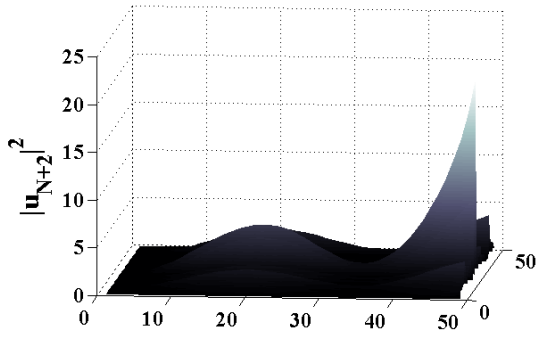
۴-استفاده ازآرایه های فیبرنوری درلیزرقفل شدگی مد

در مرجع[۲] کوتز و همکارانشان نشان داده‌اند که می‌توان از آرایه‌های موجبری در لیزر قفل‌شدگی‌مد 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:

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

$$(7)i\frac{du_n}{dz}+C(u_{n+1}+u_{n-1})+C_{n,N+1}u_{N+1}$$
$$+C_{n,N+2}u_{N+2}+\beta_2\frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2}+\gamma|u_n|^2u_n$$
$$+i\alpha u_n=0,$$
$$(8)i\frac{du_{N+1}}{dz}+\sum_1^N C_{n,N+1}u_n+\beta_{21}\frac{\partial^2 u_{N+1}}{\partial t^2}$$
$$+\gamma_1|u_{N+1}|^2u_{N+1}+i\alpha u_{N+1}=0,$$
$$(9)i\frac{du_{N+2}}{dz}+\sum_1^N C_{n,N+2}u_n+\beta_{22}\frac{\partial^2 u_{N+2}}{\partial t^2}$$
$$+\gamma_2|u_{N+2}|^2u_{N+2}i\alpha u_{N+2}$$
$$-ig(z)(1+\tau\frac{\partial^2}{\partial t^2})u_{N+2}=0.$$

دراین‌معادلات بهره ازفرم 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 τ پهنای طیف بهره راکنترل می‌کند و مقدار آن ۰,۰۸ است[۲]. هدف ازلیزر قفل‌شدگی مد دستیابی به پالس‌های بسیار کوتاه با پیک تیز و انرژی بالا است. بنابراین، ورودی نویزسفید انتخاب شده، طول فیبر۱۶mm،ضریب اتلاف فیبر $\alpha=0.2\frac{dB}{Km}$ و $g=24.4dB$ 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 می‌توان همراه با انتقال کامل یک پالس فشرده باتوان بالا نیز به دست آورد. دردور دوم جایگزیدگی 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.



شکل۵: انتشار پالس نویزسفید در کانون خروجی. در طول انتقال پالس کوتاه باتوان بالا تشکیل شده‌است.

۵- نتیجه‌گیری:

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 اگرپمپ را به یکی از کانون‌های واردکنیم،نوردرکانون 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 durchSteuerungderemissioneinesoptischen masers (Auskopple-modulation)*, **Phys. Lett**, ۵ (۱۹۶۳) ۱۷۹–۱۸۱.

[۲] G.BaleB., Kutz J. N.,Sandtede 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 Anjelis C., M.Ruenchik A., K.Turitsyn S., *Optical Pulse Compression Using Fiber Arrays*,**Optical Fiber Technology.** ۱ (۱۹۹۵) ۲۴۴-۲۴۶.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]