تولید سالیتون مولکول در آرایه خطی لیزری فیبر نوری

اکرم نیک نفس *[۱،۲]، حسین روح الامینی نژاد[۲]، علیرضا بهرامپور[۳]

۱،۲ ایران، کرمان، دانشگاه شهید باهنر، دانشکده فیزیک

۳ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده فیزیک

چکیده - در این مقاله تولید سالیتون مولکول در آرایه خطی لیزری فیبر نوری مورد بررسی قرار گرفته است. برای این هدف فیبرهای خاصی از آرایه توسط پالس گوسی برانگیخته شدند. فیبر مرکزی آرایه توسط عناصر خاکی نادر مانند عناصر خاکی نادر مانند *Er* یا *Yb* تقویت شده است. آرایه های فیبرنوری پتانسیل خوبی برای کنترل و مهندسی سیستم دارند و تولید سالیتون در آرایه لیزری فیبر نوری نسبت به سایر روشها بسیار کارآمدتر است. از طرفی تولید سالیتون های پایدار و قدرتمند در آرایه فیبر نوری توسط معادله گینزبرگ- لانداو مختلط به خوبی قابل توضیح است. در پاشندگی نرمال و با در نظرگرفتن مجموعه خاصی از پارامترها، سالیتون مولکول در فیبر مرکزی آرایه خطی ایجاد می شود. محاسبه عددی انرژی قیدی نشان میدهد که سالیتون مولکولهای ایجاد شده پایدار هستند.

کلید واژه: سالیتون مولکول، آرایه فیبر نوری، پالس گوسی، معادله گینزبرگ- لانداو

Generation of Soliton Molecules in Linear Fiber Laser Array

Akram Niknafs*, [1], Hossein Rooholamininejad[2], Alireza Bahrampour[3]

1, 2 Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3 Sharif University of Technology, Department of Physics, Tehran, Iran

Abstract: In this paper, generation of soliton molecule in a linear fiber laser array is investigated. For this purpose, certain fibers of this array are excited by Gaussian pulses. The central fiber of the fiber laser array is doped with rare-earth elements such as Er or Yb. Fiber arrays has powerful potential for system management and soliton generation in fiber laser array is useful compared to other methods. Furthermore, the generation of robust and stable soliton molecules in fiber array can be well described by cubic-quintic complex Ginzburg-Landau equation. With a specific set of parameters for the system in the normal dispersion regime, soliton molecules are investigated in the central fiber of linear fiber laser array. Numerical calculation of binding energy shows that generated soliton molecules are stable.

Keywords: Soliton Molecules, Optical fiber array, Gaussian pulse, Ginzburg-Landau Equation

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

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

۱- مقدمه

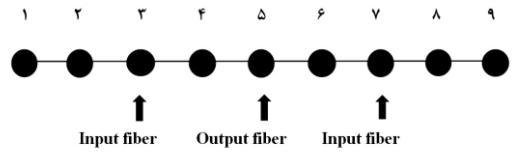
مشاهده امواج سالیتونی برای اولین بار در سال ۱۹۳۸ گزارش شد [۱]. این دسته امواج در شرایط خاصی ایجاد شده و به دلیل وجود تعادل بین اثر غیرخطی کر و پاشندگی در محیط درطول انتشار تغییر شکل نمی دهند. در این بین سالیتونهای اتلافی در اپتیک و لیزر جایگاه مهمی را به خود اختصاص دادند. این سالیتونها به دلیل وجود تعادل بین بهره و اتلاف از یک سو و اثر کر و پاشندگی از سوی دیگر تشکیل می‌شوند و می‌توانند مسافت طولانی را با شکل ثابت طی کنند. این ویژگی مهم باعث شده است که در علوم مختلف مورد توجه خاص قرار بگیرند [۲].

از طرفی با توجه به نیاز روزافزون در حوزه مخابرات و انتقال اطلاعات در سرتاسر جهان، اخیرا روشهای جدید برای کدبندی اطلاعات مورد توجه قرار گرفته است. هدف این است که در بستر فیبر نوری و با کمترین هزینه برای توسعه زیرساختها، امکان ارسال اطلاعات بیشتر فراهم شود. یک راه پیشنهاد شده برای این مشکل، استفاده از سالیتون مولکولها برای کدبندی اطلاعات است. با این تکنولوژی میتوان بجای کدبندی در مبنای دو (با پایه صفر و یک)، کدبندی را در مبنای سه (با پایه صفر، یک و دو) و یا بیشتر انجام داد[۳]. به این ترتیب سرعت انتقال داده‌ها چندین برابر افزایش پیدا می‌کند و این هدف به کمک سالیتون مولکولها می‌تواند محقق شود. سالیتون مولکول، ترکیبی از چند سالیتون است که با کمک شرایط محیطی بین آنها انرژی قیدی ایجاد شده‌است و هم‌زمان منتشر می‌شوند.

ازسوی دیگر آرایه‌های فیبرنوری غیرخطی در دهه‌های اخیر به عنوان یک ابزار مفید و دردسترس برای مطالعه پدیده‌های غیرخطی مورد استفاده قرارگرفته‌اند. این آرایه ها تاکنون در شکلهای تخت، دایروی و بیضوی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و قابلیت خوبی برای کنترل و فشرده سازی انواع پالس دارند[۴]. انتشار موج در آرایه‌های فیبر نوری تحت تاثیر پراکندگی، گسستگی و آثار غیرخطی صورت می‌گیرد و می‌توان با در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی آرایه و مواد مورد استفاده در ساخت آن، شرایط خاصی راکه برای تولید وانتشار سالیتون مولکول نیاز است در یک آرایه فیبر نوری ایجاد نمود. در این مقاله به تولید سالیتون مولکولها در آرایه‌های فیبرنوری می‌پردازیم.

۲- توضیح مدل

سیستم مورد بررسی یک آرایه خطی فیبرنوری است که از ۹ عدد فیبرنوری تشکیل شده و هر فیبر با دو فیبر کناری جفت شده‌است (شکل ۱). فیبرهای شماره ۳ و ۷ به عنوان فیبر ورودی درنظرگرفته شده‌اند. سالیتون مولکول درفیبرمرکزی (شماره ۵) تولید می‌شود و همین فیبر را برای گرفتن خروجی از سیستم انتخاب می‌کنیم.



شکل ۱: آرایه فیبرنوری تخت که شامل ۹ عدد فیبرنوری است. فیبرهای شماره ۳ و ۷ به عنوان ورودی درنظرگرفته شده و فیبرمرکزی به عنوان خروجی استفاده می‌شود.

از دیدگاه ریاضی سالیتون‌ها با معادلات مختلفی از جمله معادله غیرخطی شرودینگر و معادله گینزبرگ-لانداو مورد بررسی قرار می‌گیرند. معادله گینزبرگ-لانداو و جوابهای سالیتونی آن نیز در مقالات متعددی به تفضیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. این سالیتون‌ها شکل‌های متنوعی از جمله گوسی، سوپر گوسی، Cosh و Tanh دارند[۵و۶]. در این میان سالیتون‌های گوسی به دلیل کاربرد فراوان در مخابرات و فیبرهای نوری به صورت خاص مطالعه شده‌اند[۷]. در این کار پژوهشی از معادله cubic - quintic Ginzburg - Landau equation (CQGLE) استفاده شده است و با افزودن جملات جفت‌شدگی بین فیبرها معادله نهایی مورد استفاده به شکل زیر است:

$$i\frac{\partial E_n}{\partial z}+\left(\frac{D}{2}-i\beta\right)\frac{\partial^2 E_n}{\partial t^2}+(1-i\varepsilon)\,|E_n|^2E_n +(\nu-i\mu)\,|E_n|^4E_n+(E_{n+1}+E_{n-1})\,C=i\delta\,E_n \qquad (1)$$

در این معادله E_n دامنه میدان الکتریکی نرمالیزه شده با توان قله میدان P_0 در فیبر شماره n است. طول پراکندگی در فیبرنوری به صورت $L_D=\frac{T_0^2}{|\beta_2|}$ تعریف می‌شود که

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

β_2 پارامتر پراکندگی سرعت گروه در فیبر و T_0 پهنای تپ در نصف ارتفاع قله است. متغیر Z به صورت $Z=\frac{z}{L_D}$ و t با T_0 نرمالیزه شده اند. همچنین β، ε و δ به ترتیب فیلترطیفی، بهره غیرخطی وضریب افت خطی در فیبر هستند. اشباع بهره غیرخطی و ضریب شکست غیرخطی نیز با ν و μ نشان داده می‌شوند. همه این ضرایب در تمام فیبرها یکسان درنظرگرفته شده‌اند و فقط ضریب بهره غیرخطی فیبر مرکزی ممکن است با بقیه فیبرها متفاوت باشد. D علامت پارامتر پراکندگی است، که $D=-1$ نشان‌دهنده محیط با پاشندگی نرمال و $D=+1$ نشان دهنده پاشندگی آنومالوس می‌باشد. ضریب جفت شدگی c نیز به صورت $C=cL_D$ نرمالیزه می‌شود[۲].

۳- تولید سالیتون مولکول در آرایه فیبرنوری لیزری تخت با پالس گوسی

مهمترین خصوصیت آرایه‌های فیبرنوری تونل‌زنی بین فیبرها است که دلیل اصلی همپوشانی میدانهای الکتریکی و تامین اختلاف فاز مورد بین سالیتون‌ها و در نهایت تولید سالیتون مولکول می‌باشد. استفاده از عناصر خاکی نادر مانند Er یا Yb در ساخت فیبرها باعث می‌شود شدت پالس ورودی و امواجی که از طریق تونل زنی وارد فیبر می‌شوند تقویت شود.

۳-۱ سالیتون مولکول دوتایی

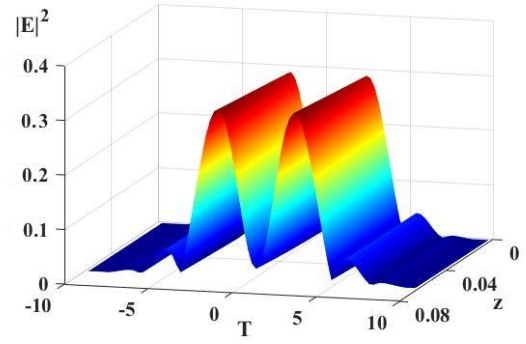
همانگونه که قبلا اشاره شد ازجمله امواجی که می‌توانند به صورت سالیتون در محیط‌های غیرخطی منتشر شوند امواج گوسی هستند. در این کار پژوهشی نیز از دو پالس گوسی مشابه به عنوان ورودی در دو فیبر شماره ۳ و ۷ استفاده می‌شود.

$$E_{3(z=0,t)}=A\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$
$$E_{7(z=0,t)}=A\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (۲)$$

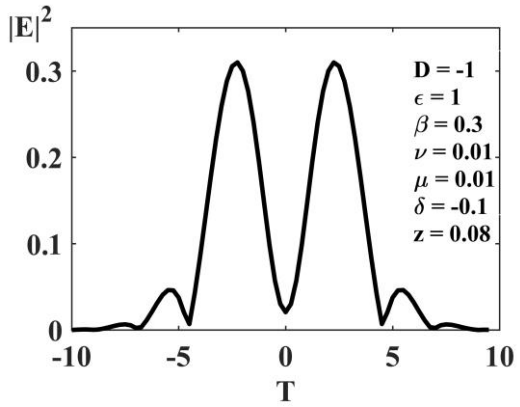
که A دامنه موج ورودی است. برای انتخاب بقیه پارامترهای مربوط به معادله CQGLE از حل‌های دقیق این معادله و همچنین مطالعات انجام شده در زمینه سالیتون‌مولکول استفاده شده‌است[۶و۸]. معادله CQGLE را برای $n=1,2,3,..,9$ و به ازای $A=2$ و $C=1$ حل می‌کنیم. بادسته‌پارامترهای زیردرطول نرمالیزه $z=0.08$ درفیبرمرکزی سالیتون‌مولکول دوتایی پایدارتولید می‌شود:

$$(D,\varepsilon,\beta,\nu,\mu,\delta)=(-1,1,0.3,0.01,-0.01,-0.1).$$

مقدار پارامترها در همه فیبرها یکسان و تعداد دور لیزر ۳۲ می‌باشد. در شکل ۲ انتشار و همچنین مقطع سالیتون مولکول دوتایی نشان داده شده است.



(آ)



(ب)

شکل ۲: (آ) سالیتون مولکول دوتایی که در فیبر مرکزی آرایه تخت تولید شده است. (ب) شکل خروجی سالیتون مولکول دوتایی.

برهم‌کنش بین سالیتون‌های اولیه در تشکیل سالیتون-مولکول نقش اصلی را بازی می‌کند و درصورتی‌که فاصله بین فیبرها زیاد باشد سالیتون‌مولکول پایداری لازم را پیدا نمی‌کند. در موارد عملی این برهم‌کنش در مقیاس

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

میکرومتر اتفاق می‌افتد. میزان انرژی سالیتون مولکول کمتر از انرژی سالیتون‌های تشکیل دهنده مولکول در حالت جدا از هم است. به تفاوت میان این دو انرژی، انرژی قیدی می‌گوییم. انرژی قیدی معمولا برحسب درصد بیان می‌شود. انرژی قیدی سالیتون مولکول دوتایی نشان داده شده در شکل ۲ به میزان $\Delta E = -6\%$ محاسبه شده است.

در حالت کلی سالیتون مولکول نسبت به تغییر پارامترها بسیار حساس می‌باشد و با تغییرات بسیار کوچک در مقادیر پارامترها سالیتون مولکول پایداری و تعادل را از دست می‌دهد.

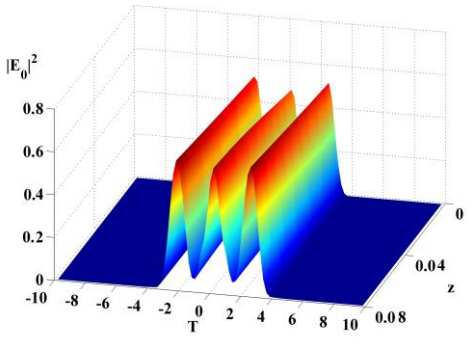
۲-۳ سالیتون مولکول سه تایی

با تغییر پارامترها می‌توان مرتبه های بالاتر سالیتون مولکول را نیز در فیبرمرکزی آرایه بدست آورد. نکات مهم در تعداد سالیتون مولکولها یکی تعداد و نوع پالسهای ورودی است و دیگر افزایش شدت پالس ترکیبی بر اثر تقویت که باعث شکست دامنه به قسمت‌های کوچکتر و کنار هم قرار گرفتن سالیتون‌ها ودرنهایت تشکیل سالیتون مولکول مرتبه بالاتر می‌شود.

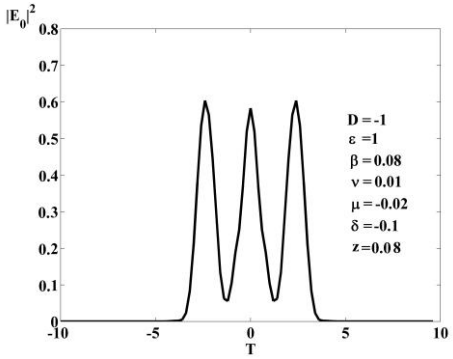
با تنظیم پارامترهای زیر در طول نرمالیزه $z = 0.08$ در فیبرمرکزی سالیتون مولکول سه‌تایی پایدار تولید می‌شود:

$$(D, \varepsilon_0, \varepsilon, \beta, \nu, \mu, \delta) = (-1,1,0,0.08,0.01,-0.02,-0.1).$$

فقط پارامتر تقویت غیرخطی درفیبرمرکزی با سایر فیبرها متفاوت است که با ε_0 مشخص شده‌است. تعداد دور لیزر ۱۸ و انرژی قیدی سالیتون مولکول تولید شده $\Delta E = -4.5\%$ می‌باشد. در شکل ۳ انتشار و همچنین مقطع سالیتون مولکول سه تایی نشان داده شده است.



(آ)



(ب)

شکل۳: (آ) سالیتون مولکول سه تایی که در فیبر مرکزی آرایه تخت تولید شده است. (ب) شکل خروجی سالیتون مولکول سه تایی.

۴- نتیجه‌گیری

دراین پژوهش با تنظیم پارامترهای آرایه خطی لیزری فیبر نوری و استفاده از پالس گوسی به عنوان ورودی، سالیتون مولکولهای دوتایی و سه‌تایی پایدار در فیبر مرکزی این آرایه تولید شده است. نکته مهم در تولید این سالیتون مولکولها، پایدار بودنشان با توجه به انرژی قیدی محاسبه شده‌است که استفاده از آنها رادرصنعت مخابرات امکان پذیر می‌کند.

مراجع

[1] J.S. Russell, *Report of the fourteenth meeting of the British Association for the Advancement of Science*, York, 1844(London 1845), pp. 311-390, plates XLVII-LVII.

[2] G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications System*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2002.

[3] F. Mitschke, A. Hause, C. Mahnke, *Soliton molecules for advanced optical telecommunications*, Eur. Phys. J. Special topics 225 2453, 2016.

[4] S. Shakeri, A. Niknafs, H. rooholamininejad, and A. Bahrampour, *Generation and compression of dissipative soliton using Fiber Arrays*, Optical Fiber Technology, 33 1-6, 2017.

[5] N.N. Akhmediev, A. Ankiewicz, *Multisoliton Solutions of the Complex Ginzburg-landau equation*, Phys. Rev. Lett, 21, 1997.

[6] N.N. Akhmediev, V. V. Afanasjev, J. M. Soto-Crespo, *Singularities and special soliton solutions of the cubic-quintic complex Ginzburg-Landau equation*, Phys. Rev. E, 53, 1996

[7] A. Biswas, *DYNAMICS OF GAUSSIAN AND SUPER-GAUSSIAN SOLITONS IN BIREFRINGENT OPTICAL FIBERS*, PIER, 33, 2001

[8] N.N. Akhmediev, A. Ankiewicz, J. M. Soto-Crespo, *Stable soliton pairs in optical transmission linas and fiber lasers*, J. Opt. Soc, 15, 1998

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]