بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

رویکرد جدید برای انتشار پالس در موجبرهای نوری با خاصیت غیرخطی بالا برای استفاده در تکنولوژی‌های کوانتومی فوتونیکی مبتنی بر اپتیک غیرخطی

ابوالفضل صفایی بزگ آبادی، محمود برهانی زرندی و محمدآقا بلوری‌زاده

گروه اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران (safaei@yazd.ac.ir)

چکیده – در این مقاله قصد داریم برای استفاده از موجبرهای نوری در تکنولوژی‌های کوانتومی فوتونیکی، رویکرد جدیدی را برای انتشار پالس در موجبرهای نوری با خاصیت غیرخطی بالا معرفی کرده و معادلات دیفرانسیل جفت‌شده‌ی حاصل از آن را شبیه‌سازی کنیم. معادلات جفت شده‌ای که در این رویکرد به دست می‌آیند معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استوکاستیکی می‌باشند. همچنین با این روش معادلات جدیدی برای توصیف فرآیند تولید ابرپیوستار در تارهای نوری به دست می‌آید که متفاوت از معادله حاکم (معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته) بر این فرآیند می‌باشد.

کلید واژه- انتشار پالس، تکنولوژی کوانتومی فوتونیکی، تولید ابر پیوستار، موجبرهای نوری

A New Approach for Pulse Propagation through Nonlinear Optical Waveguides for Applying in Photonic Quantum Technologies

Abolfazl Safaei Bezgabadi, Mahmood Borhani Zarandi, and Mohammad Agha Bolorizadeh

Atomic and Molecular Group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract- In this paper, we intend to introduce a new approach to study the pulse propagation through nonlinear optical waveguides for using them in the photonic quantum technologies. Here, we simulate the obtained coupled differential equations in the present approach where they are stochastic partial differential equations. Furthermore, by applying this approach a new set of partial differential equations is achieved for describing supercontinuum generation (SCG) process in optical fibers that it is different from the current governing equation (generalized nonlinear Schrodinger equation) for SCG.

Keywords: Optical Waveguides, Photonic Quantum Technologies, Pulse propagation, Supercontinuum Generation.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

معرفی

با توجه به توسعه روز افزون تکنولوژی‌های کوانتومی، ادوات فوتونیکی مبتی بر موجبرهای نوری در بطن تکنولوژی‌های کوانتومی فوتونیکی قرار دارتد [۱ و ۲]. از سال ۲۰۱۰ تا کنون طراحی و ساخت ادوات فوتونیکی مبتنی بر موجبرهای نوری بسیار مورد توجه دانشمندانی که در حوزه-های رمزنگاری کوانتومی، مخابرات کوانتومی، شبیه‌سازی کوانتومی و حسگری کوانتومی فعالیت می‌کنند، می‌باشد [۲]. در کارهای ابتدایی از موجبرهای ساده که بیشتر خاصیت خطی در آنها مورد توجه بود استفاده می‌شده اما با پیشرفت‌های اخیر، طراحی ادوات فوتونیکی مبتنی بر اپتیک غیرخطی برای تکنولوژی‌های کوانتومی در متن مطالعات تئوری و تجربی گروه‌های پیشگام در این زمینه قرار گرفته است [۲ و ۳].

در نتیجه برای توسعه این شاخه از اپتیک لازم است انتشار پالس در موجبرهای نوری با خاصیت غیرخطی و پاشندگی از منظر مکانیک کوانتومی بررسی شود. تا به امروز تحقیقات متنوعی در زمینه بررسی کوانتومی انتشار پالس در موجبرهای نوری انجام گرفته اما در هیچ کدام از آنها پاشندگی مراتب بالاتر از مرتبه دوم لحاظ نشده‌اند [۴].

در این مقاله ضمن معرفی رویکرد کوانتومی برای این کار، معادلات انتشار پالس به دست آمده از این رویکرد شبیه-سازی می‌شوند. این معادلات می‌توانند افت‌وخیزهای کوانتومی در انتشار پالس را توصیف کنند.

همچنین از آنجا که منابع نور ابرپیوستار بسته به پالس ورودی تا حدود ۵۰ درصد افت‌وخیز در پروفایل زمانی خود دارند، با بکارگیری همین رویکرد معادلاتی را برای مطالعه افت‌وخیزها در فرآیند تولید ابرپیوستار مشخص کرده و آنرا برای یک نمونه تار بلور فوتونی که مشخصات اپتیکی آن در [۵] آمده، شبیه‌سازی می‌کنیم.

مبانی نظری

هنگامی که بخواهیم انتشار میدان‌های الکترومغناطیسی را از دیدگاه مکانیک کوانتومی بررسی کنیم ابتدا باید میدان‌ها کوانتیزه شوند [۴]. به این منظور باید یک لاگرانژی برای سیستم مورد نظر حدس زده شود به گونه‌ای که هامیلتونی و معادلات حرکت به دست آمده از این لاگرانژی به ترتیب با انرژی سیستم و معالات ماکسول برابر باشند [۴]. سپس با تعریف مختصه و تکانه تعمیم یافته مناسب، لاگرانژی و هامیلتونی بر حسب آنها باز نویسی شود. در ادامه با اعمال روابط جابجایی دیراک هامیلتونی بین مختصه و تکانه تعمیم یافته، هامیلتونی کوانتیزه می‌شود. در انتها عملگرهای خلق و فنایی بر حسب مختصه و تکانه تعمیم یافته نوشته شده و هامیلتونی برحسب این عملگرهای خلق و فنا بیان می‌شود. با استفاده از این هامیلتونی و همچنین معادله مَستر و به-کارگیری نمایش پی مثبت [۶]، تابع پی طبق معادله فوکر-پلانک با ضرایب پخشی نیمه-قطعی مثبت تحول می‌یابد [۴]. به طور کلی معادله فوکر- پلانک با ضرایب پخشی نیمه-قطعی مثبت متناظر با معادلات دیفرانسیل استوکاستیکی ایتو جفت‌شده برای ویژه مقدارهای عملگرهای خلق و فنا می‌شود. برای مسئله انتشار میدان الکترومغناطیسی در موجبرهای نوری معادلات جفت‌شده‌ای به صورت:

$$\frac{\partial}{\partial z}\Phi^{m}(T,z)=\left(m\frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2}{\partial T^2}+\frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3}{\partial T^3}\right)\Phi^{m}(T,z) \qquad (1)$$
$$mi\gamma\Phi^{\pm}(T,z)\Phi^{m2}(T,z)+\sqrt{\pm i\gamma}\xi^{m}(T,z)\Phi^{m}(T,z)$$

به دست می‌آیند که در حالت کلی $\Phi^{+}(T,z)$ و $\Phi^{-}(T,z)$ به ترتیب میدانهای متناظر با ویژه مقدارهای عملگرهای خلق و فنا هستند که همیوغ مختلط یکدیگر نبوده، اما $\xi^{-}(T,z)$ و $\xi^{+}(T,z)$ توابع استوکاستیکی گوسی حقیقی هستند. ضرایب β_2، β_3 و γ به ترتیب ضریب پاشندگی مرتبه دوم و سوم و پارامتر غیرخطی موجبرند.

معادله (۱) حاکم برای توصیف کوانتومی انتشار میدان در موجبر نوری در حضور جمله پاشندگی مرتبه سوم ، β_3، بوده و شکل معادله شرودینگر غیرخطی در حضور جمله استوکاستیکی را دارد. این معادله به خوبی می‌توانند افت-وخیزهای کوانتومی ذاتی در پالس انتشاری در موجبر را نشان دهند. نظریه‌های کوانتومی که تاکنون برای انتشار پالس در تار نوری وجود داشتند شامل جمله پاشندگی مرتبه سوم نبوده‌اند. در سامانه‌های مخابرات نوری برای

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

افزایش آهنگ بیت، طول موج پالس ورودی نزدیک به طول موج پاشندگی صفر، $\beta_2 = 0$، محیط انتخاب می‌شود. بنابراین جمله پاشندگی مرتبه سوم اهمیت ویژه‌ای دارد.

منابع نوری ابرپیوستار یکی از پیشرفت‌های مهم در زمینه اپتیک غیرخطی بوده که کاربردهای گسترده‌ای در پیشبرد علم و صنعت دارا می‌باشند.

همان طور که در بخش معرفی ذکر شد این منابع بسته به مشخصه‌های پالس ورودی طیف ناپایداری را ایجاد می‌کنند و به اصطلاح در طیف افت‌وخیزهای قابل‌توجه‌ای اتفاق می‌افتد. این مشکل باعث می‌شود که منابع نوری ابرپیوستار در برخی کاربردهای دقیق غیر قابل استفاده باشند. قسمت اصلی این نوفه ریشه در نوفه کوانتومی دارد و برای فرآیندهای انتشار در تار نوری که منجر به تولید مولفه‌های بسامدی جدید می‌شود ذاتی است. این موضوع یکی از مسائلی است که محققان این عرصه علمی تا به امروز در پی یافتن راه حلی برای آن هستند. بررسی کوانتومی تولید ابرپیوستار نه تنها به منظور توسعه و بررسی کوانتومی آن بلکه با گسترش علوم بین رشته‌ای مثل مخابرات کوانتومی و بیولوژی کوانتومی و...، که نیازمند اندازه‌گیری هستند و همچنین کاربردهای آنها، و این‌که می‌توان برای توسعه مطالعات نظری و عملی این علوم از تولید ابرپیوستار استفاده کرد، از اهمیت بالایی برخوردار است.

همچنین اطراف سالیتون‌های تشکیل شده در این فرآیند که به طور کلی به سالیتون‌های رامان معروف هستند افت‌وخیزهایی وجود دارد که منشاء اصلی آن‌ها نوفه کوانتومی است. این سالیتون‌ها می‌توانند با یکدیگر برهم‌کنش کنند. بعلاوه این‌که به علت ضریب پاشندگی مرتبه سوم، اثر رامان و پدیده خود سراشیبی اگر این نوع سالیتون از سالیتون مراتب بالا باشد به سالیتون‌های مراتب پائین‌تر و پایه شکافته می‌شود. بنابراین ارائه کردن مدلی کوانتومی می‌تواند به درک بهتر فرآیند تولید ابرپیوستار بیانجامد و حتی باعث شود کاربردهای جدیدی برای آن پیدا شود. با به‌کارگیری رویکردی که در ابتدای این بخش بیان شد، معادله استوکاستیکی برای انتشار میدان $\Phi^m(T,z)$ در تار نوری برای توصیف فرآیند ابرپیوستار به‌صورت:

$$\frac{\partial}{\partial z}\Phi^m(T,z)=\left(m\frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2}{\partial T^2}+\frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3}{\partial T^3}+L\right)\Phi^m(T,z) \pm i\left(\gamma \pm i\frac{d\gamma}{d\omega}\frac{\partial}{\partial T}\right)\Psi(T,z)+\sqrt{\pm i2\gamma}\,\xi^m(T,z)\Phi^m(T,z) \quad (۲)$$

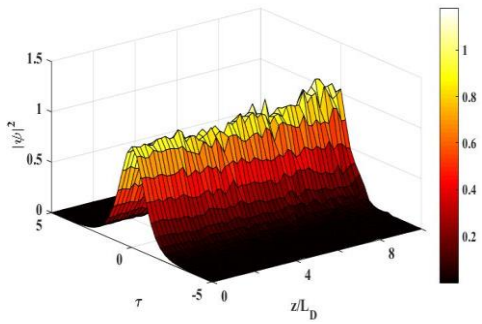
به‌دست می‌آید که در آن

$$\Psi(T,z)=\Phi^+(T,z)\Phi^-(T,z)\left[\int R(T')\Phi^-(T-T',z)\,dT'\right] +\Phi^-(T,z)\left[\int R(T')\Phi^+(T-T',z)\Phi^-(T-T',z)\,dT'\right] \quad (۳)$$

و R(T) تابع پاسخ تاخیری رامان محیط است. معادله (۲)، معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم‌یافته کوانتومی برای بررسی فرآیند تولید ابرپیوستار در تار نوری است. تفاوتی که در اینجا با معادله کلاسیکی این فرآیند وجود دارد این است که علاوه بر حضور جمله استوکاستیکی که افت‌وخیزهای کوانتومی را توصیف می‌کند و منبع ذاتی نوفه کوانتومی می‌باشد و همچنین جفت شدگی معادلات، جمله متناظر با $\int R(T')\Phi(T-T',z)\,dT'$، در مدل کلاسیکی وجود ندارد.

نتایج شبیه‌سازی

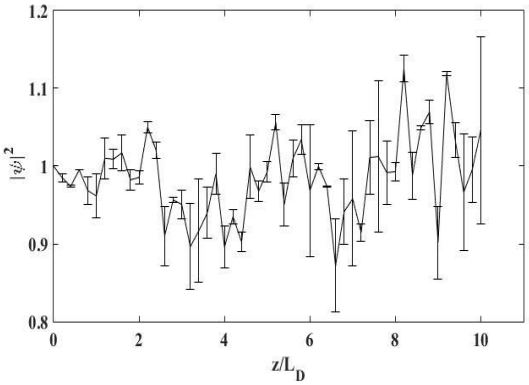
در اینجا با در نظر گرفتن یک تار نوری رایج، معادلات (۱) و (۲) را با استفاده از روش رونگ-کوتا برای معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استوکاستیکی به صورت عددی حل کردیم که نتایج به دست آمده از آن در شکل‌های (۱) و (۲) آورده شده است.



شکل ۱: شدت پروفایل زمانی سالیتون انتشاری در تار نوری برحسب طول انتشار.

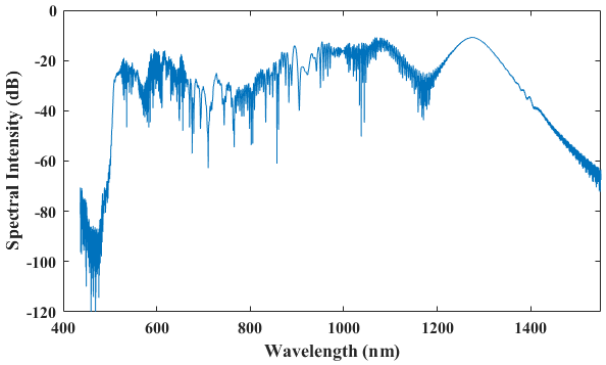
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]



شکل ۲: افت‌وخیزهای کوانتومی قله سالیتون انتشاری برحسب طول انتشار.

شکل‌های ۱ و ۲ افت‌وخیزهای کوانتومی در اطراف قله سالیتون منتشر شده در تار نوری را به وضوح نشان می‌دهد. از لحاظ ریاضی دلیل این افت‌خیزها وجود جملات استوکاستیکی در معادلات ۱ و۲ می‌باشد. اما از لحاظ فیزیکی حضور جملات استوکاستیکی در معادلات ۱ و ۲ به معادله فوکر-پلانک که از معادله «مستر» حاصل می‌شود برمی‌گردد. نکته‌ای که باید توجه شود این است که این افت‌وخیزها ذاتی هستند. البته می‌شود با استفاده از چالندگی این افت‌وخیزها را در اطراف سالیتون انتشاری کاهش داد.



شکل ۳: طیف ابرپیوستار تولید شده در خروجی تار بلور فوتونی ذکر شده در [۵] برای مدل کوانتومی.

در شکل ۳ طیف خروجی از تار بلور فوتونی برای مدل کوانتومی در حالت میانی آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که طیف به‌دست آمده از مدل کوانتومی نسبت به مدل کلاسیکی مقداری پهن‌تر می‌باشد. این شکل بیان می‌کند که قله سالیتون رامان ایجاد شده در مدل کوانتومی در طول موج ۱۳۰۰ نانو متر قرار دارد در حالی که در مدل کلاسیکی، این قله در طول موج ۱۲۲۰ نانو متر شکل می‌گیرد. دلیل اصلی این تفاوت، حضور جمله اضافی در معادله مربوط به مدل کوانتومی می‌باشد. همچنین از شکل ۳ بر می‌آید که مدل کوانتومی شانه‌های بسامدی زیادتر و به هم نزدیکتری پیش‌بینی می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که سالیتون انتشاری در موجبر علاوه بر نوفه‌های ناشی از ناهمگنی محیط یا تغییرات منبع نور ورودی، دستخوش افت‌وخیزهای ذاتی می‌شود که منشا کوانتومی دارند. بنابراین استفاده از موجبرهای نوری در تکنولوژی‌های کوانتومی فوتونیکی مستلزم کاهش این نوفه‌های ذاتی می‌باشد. همچنین نشان دادیم که با استفاده از رویکرد کوانتومی می‌توان معادلات جدیدی را برای توصیف فرآیند تولید ابرپیوستار به دست آورد. طیف شبیه‌سازی شده در این حالت در مقایسه با مدل کلاسیکی پهن‌تر بوده و قله سالیتون رامان در این فرآیند در طول موج بلندتری قرار دارد.

مرجع‌ها

[1] A. Acín *et al.*, “The quantum technologies roadmap: a European community view,” New J. Phys., 20, 080201, 2018.

[2] A. Aspuru-Guzik and P. Walther, “Photonic quantum simulators”, Nature Phys., 8, 285, 2012.

[3] M. J. Hartmann, “Quantum simulation with interacting photons”, J. Opt. 18, 104005, 2016.

[4] A. Safaei, A Bassi, and M. A. Bolorizadeh, “Quantum treatment of field propagation in a fiber near the zero dispersion wavelength”, J. Opt., 20, 055402, 2018.

[5] J. M. Dudley, G. Genty, and S. Coen, “Supercontinuum generation in photonic crystal fiber”, Rev. Mod. Phys., 78, 1135, 2006.

[6] P. D. Drummond, C.W. Gardiner, and D. F. Walls, “Quasiprobability methods for nonlinear chemical and optical systems”, Phys. Rev. A, 24, 914, 1981.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]