بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

اندازه‌گیری پاشندگی فیبرهای نوری با لیزر فیبری فمتوثانیه قفل مدی در رژیم سالیتونی

مهدی مزدور دشتابی، سید مجتبی هاشمی پیکر و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران

چکیده – باندهای کناری *Kelly*[1]، مشخصه لیزرهای قفل مدی سولیتونی می‌باشند که مکان آن ها به پاشندگی خالص کاواک وابسته است. در این مقاله، با قرار دادن قطعه کوتاهی از فیبر مورد آزمایش در کاواک لیزر فیبری فمتوثانیه با پاشندگی خالص غیرمعمول و اندازه گیری جابه جایی باندهای کناری *Kelly*، پاشندگی فیبر مورد نظر به دست آمده است. اندازه گیری پاشندگی برای هر دو مورد فیبرهای با پاشندگی معمول و غیر معمول انجام شده است. نتایج به دست آمده در توافق بسیار خوبی با پارامترهای ارائه شده توسط شرکت سازنده فیبرها می‌باشد.

کلید واژه- باند کناری Kelly، پاشندگی فیبر، لیزر سولیتون، لیزر فمتوثانیه، لیزر فیبری

Optical Fiber Dispersion Measurement by Using Mode Locked Femtosecond Fiber Laser at Soliton Regime

Mahdi Mozdoor Dashtabi, Seyed Mojtaba Hashemi Peykar and Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- Kelly sidebands, is the characteristic of mode locked soliton lasers that their position is dependent on the net cavity dispersion. In this paper, by placing a short piece of the test fiber in a femtosecond fiber laser cavity with net anomalus dispersion and measuring the kelly sidebands shift, the fiber dispersion is obtained. Dispersion measurement has done in fibers with normal dispersion as well as in anomalus dispersion. Results are in very good agreement with the parameters attained from the fiber manufacturers.

Keywords: Kelly Sidebands, Fiber Dispersion, Soliton Laser, Femtosecond Laser, Fiber Laser

[1] Kelly Sidebands

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

۱- مقدمه

پاشندگی رنگی یکی از پارامترهای کلیدی فیبرهای نوری به ویژه در زمینه لیزرهای فیبری فوق کوتاه می‌باشد. روش‌های بسیاری به منظور اندازه‌گیری این پارامتر ارائه شده است که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. برپایه فرایند به کار رفته، این روش‌ها را می‌توان به دو دسته خطی و غیرخطی دسته‌بندی کرد. روش سر راست برای اندازه‌گیری پاشندگی در فیبرهای ناآلاییده، روش‌های خطی مانند روش زمان پرواز [۱و۲]، جابه‌جایی فازی [۳و۴] و یا روش‌های تداخل سنجی [۵-۸] هستند. با این حال روش زمان پرواز برای اندازه‌گیری در فیبرهای کوتاه و یا فیبرهای بهره، به دلیل جذب بسیار در این فیبرها، مناسب نمی‌باشد. از سوی دیگر روش‌های جابه‌جایی فاز و تداخل سنجی نیز نیازمند سیستم‌های بسیار پیچیده می‌باشند.

علاوه بر روش های خطی، روش‌هایی نیز بر پایه پدیده‌های غیرخطی، مانند روش بر پایه مخلوط چهار موج (FWM)، بنا شده‌اند [۹-۱۲]. مهمترین مزیب روش‌های غیرخطی، توانایی آن‌ها در اندازه‌گیری پاشندگی در فیبرهای با طول میانه (از چند تا چند صد متر) است در حالی که روش‌های غیرخطی به طول‌های بسیار کوتاه (در محدوده متر) و یا بسیار بلند (در محدوده کیلومتر) محدود شده‌اند. با این حال روش‌های مرسوم غیرخطی، نیاز به آگاهی دقیق از پارامترهای فیبر مانند ضرایب غیرخطی و نیز پارامترهای لیزر پمپ دارد.

در کنار این روش‌ها، تعدادی روش اندازه‌گیری پاشندگی درون کاواکی نیز برپا شده است. ناکس[۲]، روشی برپایه اندازه‌گیری تاخیر گروه[۳] در یک لیزر قفل مدی کنش‌پذیر[۴] تیتانیوم سفایر برای اندازه‌گیری پاشندگی درون کاواکی ارائه داد [۱۳]؛ با این حال، اندازه گیری‌ها برای المان‌های توده‌ای بود. برپایه روش ناکس، برخی اندازه گیری‌ها در کاواک های فیبری توسط دیگران انجام گرفت، با این وجود این چیدمان‌ها کاملا فیبری نبوده و تعدادی المان فضای آزاد در آن‌ها به کار رفته است و به علاوه این روش نیاز مند به کار گیری لیزر فمتوثانیه با طول موج کوک‌پذیر و همچنین فیلتر کوک‌پذیر می‌باشد.

در این مقاله، با بهره‌گیری از یک کاواک تمام فیبری فمتوثانیه با پاشندگی خالص غیرمعمول و اندازه‌گیری جابه‌جایی قله باندهای کناری Kelly پس از اضافه کردن فیبر آزمون درون کاواک، پاشندگی سرعت گروه فیبرهای نوری با پاشندگی منفی و نیز مثبت اندازه گیری شده است.

۲- چیدمان تجربی

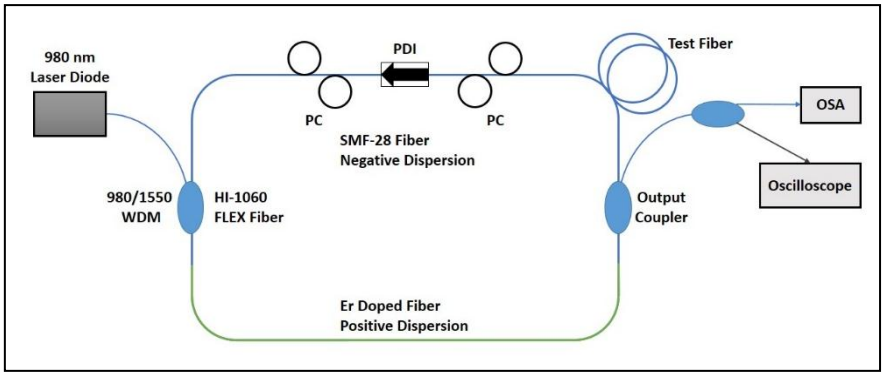
شماتیک چیدمان آزمایشگاهی مورد نظر در شکل ۱ آمده است. کاواک حلقوی تمام فیبری تک سویه این لیزر شامل فیبر بهره با آلایش اربیوم می باشد که با یک لیزر دیودی با طول موج ۹۷۶ نانومتر و توان بیشینه ۵۰۰ میلی وات، به کمک یک کوپلر WDM ۹۸۰/۱۵۵۰ در آرایش هم سویه پمپ می شود. یک ایزولاتور نوری حساس به قطبش که در میان دو کنترل کننده قطبش جای گرفته است، علاوه بر اینکه به عنوان قفل مدی کننده کنش پذیر NLPR به کار رفته است، نقش تک سویه کننده کاواک را نیز بر عهده دارد [۱۴و۱۵].

طول کلی کاواک لیزر حدود ۹.۳۴ متر می‌باشد که در نتیجه موجب می‌شود که لیزر در نرخ تکراری در حدود ۲۲ مگاهرتز کار کند.

برای اندازه‌گیری پاشندگی فیبر مورد نظر، آن را طبق شکل ۱، درون کاواک و میان کوپلر خروجی و ایزولاتور قرار می‌دهیم. این محل از این رو انتخاب شده است که نوع فیبرهای به کار رفته در این ناحیه فیبر استاندارد SMF-28 می باشد و بنابراین فرایند جوش دادن فیبرها به این گونه فیبر بسیار مورد اعتمادتر می‌باشد که در نتیجه به کمینه شدن تغییرات تلفات در نقطه جوش در آزمایش‌های مختلف منجر می شود. به علاوه از آن جا که کمینه انرژی پالس در این نقطه، یعنی پس از کوپلر خروجی می‌باشد، اضافه کردن فیبر اضافی در این نقطه کمترین تاثیر را بر روی شرایط فرایند غیرخطی قفل مدی شدن دارد.

[2] Knox
[3] Group Delay
[4] Passive Mode Locking

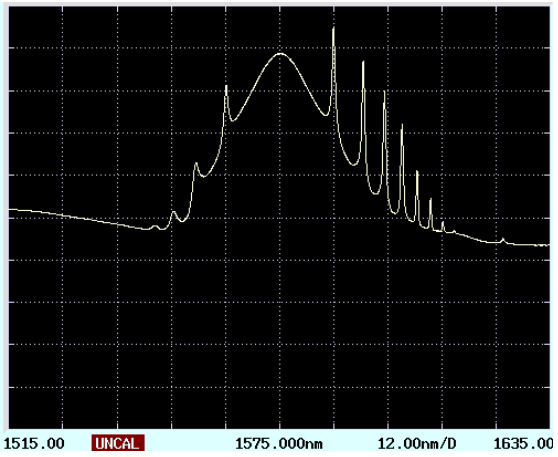
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل۱) چیدمان تجربی لیزر به کار رفته به منظور اندازه گیری پاشندگی فیبر

۳- نتایج تجربی

نمونه ای از طیف خروجی از لیزر در شکل ۲ دیده می‌شود. چنانچه در شکل مشخص است، مرتبه‌های زیادی از باندهای کناری Kelly در این طیف وجود دارد. با مقایسه جابه‌جایی طول موجی این باندها پیش و پس از قرار دادن فیبر مورد نظر، می‌توان پاشندگی سرعت گروه آن را به دست آورد.



شکل۲: نمونه ای از طیف به دست آمده از لیزر ساخته شده. باندهای کناری Kelly در این طیف، نشان دهنده کارکرد لیزر در رژیم سولیتونی می باشد.

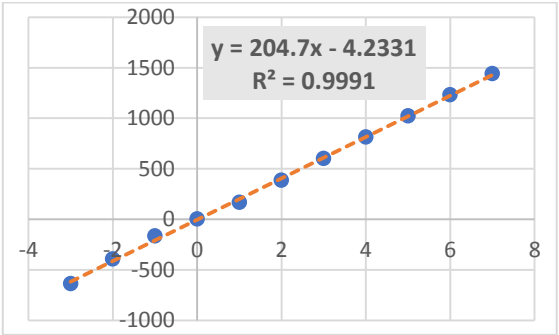
به این ترتیب که فاصله طول موجی هر مرتبه باند را نسبت به طول موج مرکزی پالس به دست می آوریم و به کمک رابطه زیر می توان پاشندگی مرتبه دوم کاواک را به دست آورد [۱۶]:

$$\Delta\lambda_N = \lambda_0 \sqrt{\frac{2N}{cDL} - 0.0787\frac{\lambda_0^2}{(c\tau)^2}}$$

که در آن D، پارامتر پاشندگی فیبر، L طول فیبر، c، سرعت نور، λ_0، طول موج نور و τ، پهنای زمانی پالس می باشد.

با رسم نمودار $\left(\Delta\lambda_N\right)^2$ نسبت به مرتبه باند کناری،N ، نموداری تقریبا خطی به دست می آید که با اندازه گیری شیب خط برازش شده بر روی داده ها، m، از رابطه بالا برای پاشندگی کلی کاواک داریم:

که در نتیجه با اندازه گیری و مقایسه پاشندگی کلی کاواک پیش و پس از اضافه کردن فیبر آزمون، می‌توان پاشندگی آن را به دست آورد. نمونه‌ای از نمودار به دست آمده متناظر با نمودار طیفی شکل ۲، در شکل ۳ آمده است. در این نمودار طول موج مرکزی ۱۵۷۵ نانومتر است.



شکل ۳: نمودار تغییرات $\left(\Delta\lambda_N\right)^2$ نسبت به مرتبه باند کناری.N

چنانچه از پارامتر R^2 دیده می شود، نمودار بسیار نزدیک به خط راست است.

در جدول ۱، پاشندگی به دست آمده در این آزمایش با

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

پاشندگی ارائه شده در دیگر مراجع مقایسه شده است. چنانچه از نتایج به دست آمده مشخص است، تطابق خوبی بین این روش با دیگر روش‌های اندازه‌گیری وجود دارد.

جدول ۱: مقایسه پارامتر پاشندگی به دست آمده از این روش با نتایج ارائه شده در دیگر مراجع.

نوع فیبر	این مقاله	دیگر مراجع
SMF-28	17.073	≤ 18
1060XP	8.502	~ 8.6
Er110-4/125	-7.820	~ -8

۴- نتیجه‌گیری

با اندازه‌گیری جابه‌جایی باندهای Kelly در لیزر تمام فیبری فمتوثانیه با آلایش اربیوم پیش و پس از اضافه کردن فیبر مورد نظر، پاشندگی سرعت گروه فیبر اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری بر روی فیبرهای با پاشندگی‌های متفاوت مثبت و منفی انجام گرفته است. نتایج به دست آمده از این روش، موافق با نتایج حاصل از دیگر روش‌های موجود می‌باشد

مراجع

[۱] L. G. Cohen, *Comparison of single mode fiber dispersion measurement techniques*, **J. Lightwave Technol.** 5, 958-966 (1985).

[۲] L. G. Cohen and C. Lin: **IEEE J. Quantum Electron**. 14 (1987) 855.

[۳] BRUNO COSTA, DANIELE MAZZONI, MARIO PULEO, AND EMILIO VEZZONI, *Phase Shift Technique for the Measurement of Chromatic Dispersion in Optical Fibers Using LED's*, **IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES**, VOL. MTT-30, NO. 10, OCTOBER 1982.

[۴] B. Costa, D. Mazzoni, M. Puleo and E. Vezzoni: **IEEE J. Quantum Electron**. 18 (1982) 1509.

[۵] J. Stone and L. G. Cohen: **Electron. Lett**. 18 (1982) 716.

[۶] S. Diddams and J. C. Diels, *Dispersion measurements with white-light interferometry*, **J. Opt. Soc. Am. B** 13, 1120-1128 (1995).

[۷] M. Tateda, N. Shibata and S. Seikai, *Interferometric method for chromatic dispersion measurement in a single-mode optical fibers*, **IEEE J. Quantum Electron.** 17, 404-407 (1981).

[۸] M.J. Saunders and W.B. Gardner, *Interferometric determination of dispersion variations in single-mode fibers*, **J. Lightwave Technol.** 5, 1701-1705 (1987).

[۹] L. F. Mollenauer, P. V. Mamyshev and M. J. Neubelt, *Method for facile and accurate measurement of optical fiber dispersion maps*, **Opt. Lett.** 21, 1724-1726 (1996).

[۱۰] G. K. Wong et al., *Characterization of chromatic dispersion in photonic crystal fibers using scalar modulation instability*, **Opt. Express** 13, 8662-8670 (2005).

[۱۱] B. Auguie, A. Mussot, A. Boucon, E. Lantz and T. Sylvestre., *Ultralow chromatic dispersion measurement of optical fibers with a tunable fiber laser*, **IEEE. Photon. Technol. Lett.**, 17, 1825-1827 (2006).

[۱۲] J.M. Chávez Boggio and H.L. Fragnito, *Simple four-wave-mixing-based method for measuring the ratio between the third- and fourth-order dispersion in optical fibers*, **J. Opt. Soc. Am. B** 24, 2046-2054 (2007).

[۱۳] W H. Knox, *In situ measurement of complete intracavity dispersion in anoperating Ti:sapphire femtosecond laser*, **OPTICS LETTERS** / Vol. 17, No. 7 / April 1, 1992

[۱۴] مزدور دشتابی، مهدی ؛ مسعودی، رضا، *ساخت لیزر تمام فیبری با دوپ اربیوم با طول پالس حدود ۱۰۰ فمتوثانیه و نرخ تکرار ۲۹ مگاهرتز*، **۲۷مین کنفرانس انجمن فیزیک ایران**.

[۱۵] مهدی مزدور دشتابی، سمانه معنوی رودسری، رضا مسعودی، *ساخت لیزر فیبری فمتوثانیه آلاییده به اربیوم هماهنگ قفل مدی شده در باند ۱۵۵۰ نانومتر و نرخ تکرار ۱۹۵ مگاهرتز*، **نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران**.

[۱۶] Michael L. Dennis and Irl N. Duling I11, *Experimental Study of Sideband Generation in Femtosecond Fiber Lasers*, **IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS**, VOL. 30, NO. 6, JUNE 1994

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