# بررسی تحول مدی در تار نوری نازک شده با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه

فروغ جعفری[۱]، امید رضا رنجبر نائینی[۱]، زینب چناری[۱]، پگاه زرافشانی[۱و۲]، حمید لطیفی[۱و۲]

[۱] پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله نحوه برانگیزش مدها در حین ساخت تار نوری نازک شده به وسیله روش تبدیل فوریه زمان کوتاه بررسی شده است. با انطباق نتایج تئوری و تجربی، کارآمدی این روش برای مشخصه‌یابی میکروتار/نانوتار نشان داده شده است. این نتایج به ما اجازه می‌دهد تا فرایند ساخت را بهینه کنیم و روی قطر نهایی ساختار، تعداد مدها و ثابت انتشار مدها کنترل داشته باشیم.

**کلید واژه- تار نوری نازک شده، تبدیل فوریه زمان کوتاه، تزویج مدی، تحول مدی، میکروتار/ نانوتار.**

# Mode evolution in a tapered optical fiber via short time Fourier transform

Forugh Jafari[1], Omid Reza Ranjbar Naeini[1], Zeynab Chenari[1], Pegah Zarafshani[1,2], Hamid Latifi[1,2]

**1. Laser & Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran**
**2. Department of *Physics*, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran**

**latifi@sbu.ac.ir**

Abstract- we demonstrated the mode evolution during the tapering process of single mode optical fiber through the short time Fourier transform analysis. We propose this method for characterization of tapered fiber. This results allow us to be able to optimize the tapering process to control the radius of tapered fibers, the number of modes and their propagation constants.

**Keywords: Tapered fiber, short time Fourier transform, mode coupling, mode evolution, microfiber/nanofiber**

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]



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

## ۱- مقدمه

تارهای نوری نازک شده به دلیل آن که ابعادشان قابل مقایسه با طول موج نور منتشر شونده در آنها است ویژگی‌های جالبی چون حصر اپتیکی شدید، افزایش میدان میراشونده، افزایش گرادیان شدت میدان، افزایش شدت میدان و افزایش پاشندگی موجبر از خود نشان می‌دهند. همین ویژگی‌ها موجب شده تا از تارهای نوری نازک شده که آنها را میکرو تار/نانو تار (MNF) هم می نامند در حوزه های مختلف فوتونیک چون اپتیک کوانتومی، اپتیک غیرخطی، اپتیک میدان نزدیک، پلاسمونیک و سنجش استفاده شود[1].

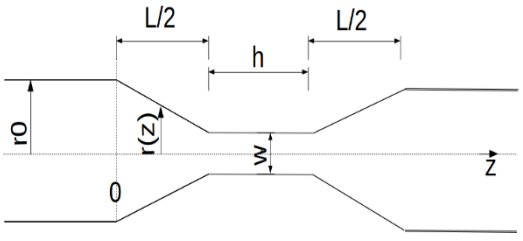
برای این که MNF گذردهی بالایی داشته باشد باید شرط گذار آدیاباتیک را ارضا کند اما از آنجایی که ساخت MNF ها با تغییر شکل موجبر استوانه‌ای همراه است، تئوری مد جفت شده، ظهور مدهای مرتبه بالاتر را پیش بینی می‌کند[2]. هر چه مدهای بیشتری برانگیخته شوند، MNF اتلاف بالاتری خواهد داشت. اطلاع دقیق از تزویج مدهای موجبر برای کنترل گذردهی و اتصال المان‌های فوتونیکی به یکدیگر امر مهمی است[3].

## ۲- تئوری

وقتی تار نوری از دو طرف متقارن کشیده شود، مطابق پیش‌بینی مدل توسعه یافته بر اساس بقای حجم، پروفایل MNF نمایی خواهد بود. طبق این مدل قطر کمر MNF از رابطه(۱) به دست می‌آید[4].

$$w = r_0 e^{-L/2h} \quad for \quad L/2 \le z \le \frac{L+h}{2} \qquad (1)$$

در شکل ۱ شماتیک MNF آمده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است پارامتر L طول ناحیه گذار، w قطر کمر، $r_0$ شعاع تار نوری قبل از نازک شدن و h طول کمر (طول ناحیه داغ شعله) می‌باشد.




شکل ۱:تار نوری نازک شده

وقتی که تار نوری نازک شود، می‌توان از تأثیر هسته اولیه چشم پوشید، در این وضعیت غلاف حکم هسته و هوا حکم غلاف را برای موجبر جدید پیدا می‌کند. از آنجایی که اختلاف ضریب شکست هسته و غلاف در ساختار جدید نسبت به قبل بسیار بزرگتر است دیگر تقریب هدایت ضعیف برقرار نخواهد بود و تبهگنی بین مدهای هم‌خانواده شکسته می‌شود[5]؛ با اینکه احتمال تزویج توان بین مدهایی که کمترین اختلاف ثابت انتشار را دارند بیش‌تر است ولی چنانچه فرایند کشش متقارن باشد، تنها مدهایی برانگیخته می‌شوند که تقارن سمتی یکسانی با مد پایه داشته باشند[6]، مثل HE12 و EH11. ظهور هرگونه بی‌تقارنی در MNF می‌تواند منجر به برانگیختگی سایر مدها(مدهای هدایتی و مدهای تابشی) و افزایش اتلاف در طیف نهایی شود. به جز مد پایه سایر مدهای هدایتی وقتی به قطر قطعشان برسند به مد تابشی تبدیل می‌شوند و بخشی از توان به این شکل تلف می‌شود[3].

اختلاف فاز و فرکانس فضایی بین دو مدی که در MNF با هم تداخل می‌کنند به ترتیب از رابطه ۲ و ۳ به دست می آید:

$$\phi_{ij}(L) = \int_0^L [\beta_i(r(z)) - \beta_j(r(z))]dz + \Delta\beta(ij)h \qquad (2)$$

$$K_{ij}(L) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\phi_{ij}}{dL} \qquad (3)$$

در فرمول های ذکر شده در بالا، $\beta_i$ ثابت انتشار مد iام و K فرکانس فضایی می‌باشد. همچنین $\phi$ اختلاف فاز بین دو مدی است که با یکدیگر تداخل می‌کنند. تبدیل فوریه برای تشخیص محتوای فرکانسی سیگنال روش مناسبی است ولی هنگامی که سیگنال بر حسب متغیر مستقلش ناپایا باشد این روش برای تشخیص نحوه تغییرات محتوای فرکانسی کفایت نمی‌کند. تبدیل فوریه زمان کوتاه از جمله روش‌های تحلیل زمان-فرکانسی است که این هدف را برآورده می‌کند، در این روش از طریق ضرب سیگنال در یک تابع پنجره، سیگنال به قسمت‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود، به طوری که در هر قسمت می‌توان سیگنال را پایا در نظر گرفت و با گرفتن تبدیل



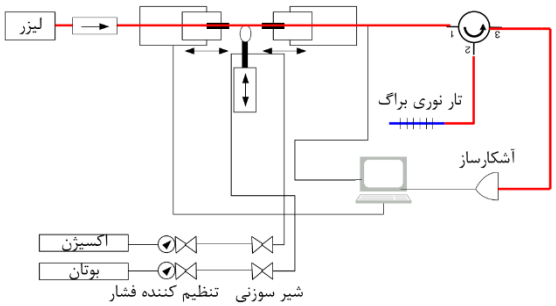
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

فوریه، فرکانس هر قسمت را به دست آورد. چون طیف عبوری از MNF در حین ساخت، یک سیگنال ناپایا است برای تشخیص محتوای زمان-فرکانسی باید از طیف تبدیل فوریه زمان کوتاه گرفت (به چنین طیفی، طیف زمانما می‌گویند). مدهای برانگیخته شده حین فرایند ساخت در طیف زمانما خودشان را نشان می‌دهند. برای تمییز مدها از یکدیگر، نیاز به حل عددی معادله مشخصه تار نوری است.[۷]

## ۳- روش ساخت MNF

چیدمان ساخت MNF در شکل۲ نشان داده شده است. در این چیدمان از یک منبع نوری با پهنای ۰,۱ نانومتر برای برر سی طیف عبوری میکروتار/نانوتار استفاده می‌شود و سپس طیف توسط آشکارساز، مورد بررسی قرار می گیرد.

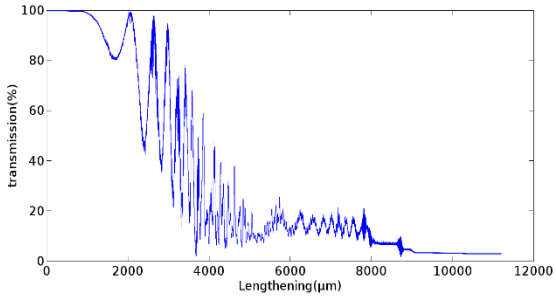



شکل ۲: چیدمان ساخت تار نوری نازک شده

تار نوری تک مد توسط گیره‌های نگه‌دارنده در موضع خود ثابت است، تار نوری توسط شعله اکسیژن-بوتان گرم می شود تا به دمای نرم شدگی برسد. سپس به طور متقارن از دو طرف کشیده می شود. در حین کشش، طیف عبوری توسط آشکارساز رصد می‌شود.

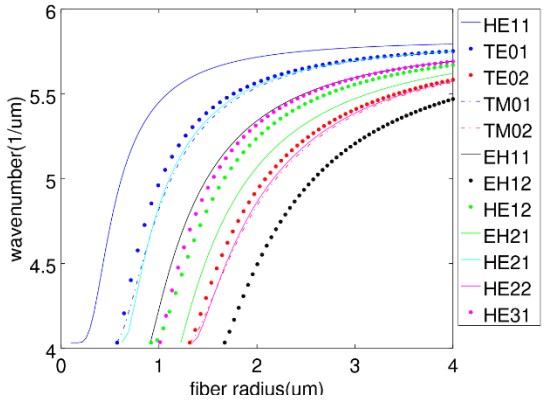
## ۴- تحول مدی

شکل(۳) تغییرات زمانی طیف عبوری را نشان می‌دهد، محور عمودی درصد گذردهی تار نوری نازک شده را نشان می‌دهد، با گذشت زمان، با افزایش طول تار نوری نازک شده بر اثر کشش، فرکانس طیف نوسانی افزایش می‌یابد. منشأ این نوسانات، تداخل بین مدهای مختلف با مد پایه است.




شکل ۳: گذردهی میکروتار بر حسب تابعی از میزان کشیدگی

از حل معادله مشخصه ثابت انتشار مدهای مختلف در طول موج ۱۵۵۴,۵ نانومتر به دست آمد، نمودار پاشندگی مدهای مختلف بر حسب شعاع تار نوری در شکل ۴ آمده است. از طریق روابط ۱ الی ۳ فرکانس فضایی محاسبه گردید و همچنین نمودار تئوری بر طیف‌نمای تجربی با تعیین طول ناحیه داغ (h)، منطبق شد. در این حالت مشاهده می شود که با کاهش ابعاد تار نوری، برانگیختگی مدهای مرتبه بالاتر ممکن می شود.



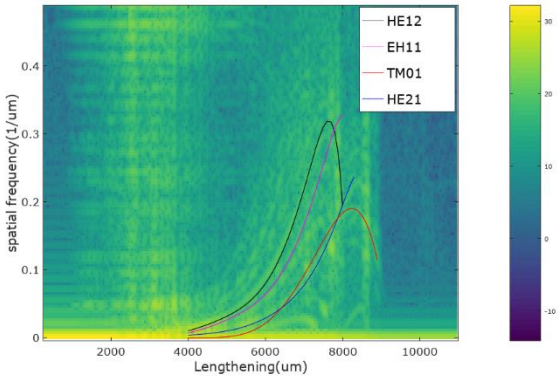

شکل ۴: پاشندگی مدهای مختلف بر حسب تابعی از شعاع تار نوری

شکل ۵، طیف نمای تار نوری نازک شده‌ای را که طیف گذردهی آن در شکل ۳ آمده است، نشان می‌دهد. در این شکل، فرکانس فضایی بر حسب طول کشش رسم شده است. مشاهده می شود که در طول‌های مشخصی امکان شکل گیری مدهای مرتبه بالاتر وجود دارد و پس از آن، برخی از مدها به ناحیه قطع می‌رسند. تطبیق نمودار تئوری بر طیف‌نمای تجربی، برانگیختگی مدهای HE12، EH11، HE21 و TM01 را نشان می‌دهد. ظهور مدهای HE12 و EH11 چون تقارن سمتیشان با مد پایه یکسان است، طبیعی می‌باشد. ولی برانگیختگی مدهای HE21 و TM01 ناشی از عدم تقارن حین فرایند ساخت است.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]




شکل ۵: طیف نمای MNF و تعیین مدهای برانگیخته شده

بی‌تقارنی ممکن اســـت در اثر لرزش تار نوری حین نازک شـدن یا حضـور ذرات در کمر MNF اتفاق بیافتد. این عوامل می‌تواند منجر به برانگیختگی مدهای هدایتی مرتبه بالاتر و نیز مدهای تابشـی شـود. علاوه بر این، تمیز بودن تار نوری برای داشـتن MNF با اتلاف کم، ضـروری اســـت. با وجود اینکه اتلاف بالا پیامد برانگیزش مدهای خانواده LP11 است ولی MNF ساخته شده در مقایسه با MNF متقارن، نسبت به دوشکستی حساس‌تر است.

## ۵- نتیجه گیری

در این بررســـی، توســـط روش تبدیل فوریه زمان کوتاه، تعداد و نوع مدهای برانگیخته شـــده حین فرآیند ساخت مشخص گردید. مدهایی که تقارن سمتی یکسانی با مد پایه نداشـتند، به دلیل شـکسـت تقارن حین فرآیند ساخت، برانگیخته شدند؛ همین امر باعث بالا رفتن اتلاف MNF ساخته شده گردید. روش مذکور برای مشخصه‌یابی MNFها مناسب است.

## مراجع

[1] Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Fibers | Limin Tong | Springer. .
[2] A. Yariv, “Coupled-mode theory for guided-wave optics,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 9, no. 9, pp. 919–933, Sep. 1973.
[3] S. Ravets, J. E. Hoffman, P. R. Kordell, J. D. Wong-Campos, S. L. Rolston, and L. A. Orozco, “Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission,” *J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA*, vol. 30, no. 11, pp. 2361–2371, Nov. 2013.
[4] T. A. Birks and Y. W. Li, “The shape of fiber tapers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 432–438, Apr. 1992.
[5] Optical Waveguide Theory | A.W. Snyder | Springer. .
[6] O. V. Ivanov, S. A. Nikitov, and Y. V. Gulyaev, “Cladding modes of optical fibers: properties and applications,” *Phys.-Usp.*, vol. 49, no. 2, p. 167, 2006.
[7] F. Orucevic, V. Lefèvre-Seguin, and J. Hare, “Transmittance and near-field characterization of sub-wavelength tapered optical fibers,” *Opt. Express, OE*, vol. 15, no. 21, pp. 13624–13629, Oct. 2007.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]