



## تبدیل طول موجی در ناحیه پاشندگی عادی براساس تارهای بلور فوتونی تزریق شده با سیال نوری

پاکارزاده، حسن؛ درخشانی، رضوان  
دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده - در این مقاله، چگونگی دستیابی به محدوده‌ی طول موجی مناسب در ناحیه مخابراتی به وسیله تبدیل طول موجی در تارهای بلور فوتونی تزریق شده با سیال نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور یک تار بلور فوتونی با خواص پاشندگی مناسب را انتخاب و تبدیل طول موجی در این تار برای یک لیزر پمپ معین، از طریق فرآیند ترکیب چهار موج بررسی می‌نماییم. با تغییر ضریب شکست سیال نوری و تغییر خواص پاشندگی تار، می‌توان ناحیه طول موج تبدیل شده را تغییر داد. نتایج نشان می‌دهد برای مورد ایده آل،  $PCF$  تزریق شده با ضریب شکست ۱.۳۲ در ناحیه پاشندگی عادی دارای بیشینه جابجایی طول موجی است که این مقدار با افزایش توان پمپ ورودی قابل افزایش است. این مقدار بسیار بیشتر از مورد مشابه در رژیم پاشندگی غیر عادی است.

کلید واژه- تار بلور فوتونی، تبدیل طول موجی، تزریق شده با سیال نوری، ناحیه پاشندگی مثبت، جابجایی طول موجی.

### Wavelength conversion in normal dispersion regime based on optofluidic infiltrated photonic crystal fibers

Hassan Pakarzadeh; Rezvan Derakhshan

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Abstract- In this paper, the wavelength conversion in optofluidic infiltrated photonic crystal fibers is investigated for achieving the suitable wavelength range in the telecommunication region. For this purpose, a photonic crystal fiber with appropriate dispersion properties is selected and wavelength conversion via four-wave mixing process for a given pump laser is studied. By changing the refractive index of the optofluidic and then varying the fiber dispersion properties, the converted wavelength region can be tuned. The results show that for the ideal case, the PCF injected with a refractive index of 1.32 in normal dispersion regime exhibits the maximum wavelength shift where this shift increases with increasing the input pump power. This amount is much higher than that of in the anomalous dispersion regime.

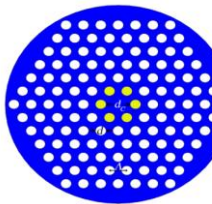
Keywords: photonic crystal fiber, wavelength conversion, optofluidic infiltrated, normal dispersion regime, wavelength shift.

## ۱- مقدمه

غیرعادی انجام شده است [۸] و در اینجا با تزریق سیال با ضریب شکست‌های مختلف، خواص پاشندگی و  $\beta_2$  را در رژیم پاشندگی عادی تغییر می‌دهیم و از این طریق جابجایی طول موجی را کنترل می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد که میزان جابجایی طول موجی بدست آمده در رژیم پاشندگی عادی بسیار بیشتر از رژیم پاشندگی غیرعادی است.

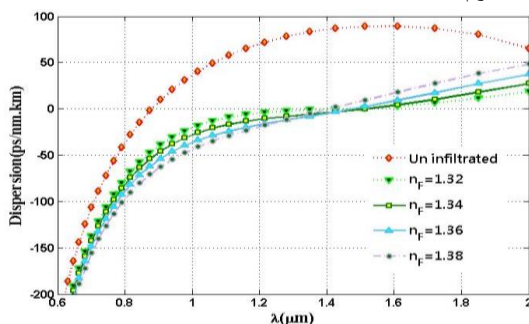
## ۲- مبانی نظری و نتایج شبیه‌سازی

PCF انتخاب شده در این تحقیق شامل حفره‌های هوای دایره‌ای با قطر  $d = 0.6(\mu m)$  در یک پس‌زمینه سیلیکا، در یک شبکه مثلثی با اندازه ثابت شبکه  $\Lambda = 2(\mu m)$  مرتب شده‌اند با فرم شش حلقه‌ی شش‌ضلعی  $N = 6$  شامل مغزی جامد با قطر  $d_c = 2\Lambda - d = 2.8(\mu m)$  می‌باشد [۸،۷] که حفره‌های داخلی‌ترین حلقه تحت تزریق انتخابی سیال قرار می‌گیرد.



شکل ۱: سطح مقطع یک PCF مغزی پر با شبکه شش‌ضلعی، شامل ۶ حلقه از حفره‌های هوا [۷].

در شکل ۲ پروفایل پاشندگی در PCFهای بدون ماده تزریقی و شامل ماده‌ی تزریقی با ضریب شکست‌های مختلف در بازه‌ی  $(1.32 \leq n_f \leq 1.38)$  بدست آمده است [۷]. تمام شبیه‌سازی‌ها را برای طول موج پمپ  $1349nm$  در محیط نرم افزار لومریکال انجام داده‌ایم که در آن برای همه‌ی تزریق‌ها رژیم پاشندگی عادی و در نتیجه ضریب پاشندگی مرتبه دوم مثبت است.



شکل ۲: مقایسه پروفایل پاشندگی بر اساس ضریب شکست‌های مختلف سیال نوری تزریق شده [۷].

ناپایداری مدولاسیون یک طرح کلی انتشار نور در یک محیط نوری غیرخطی پاشنده می‌باشد که مطابق شکل (۳)

تارهای بلور فوتونی (PCFs)، تارهای نوری با یک سطح مقطع ریزساختار شده از حفره‌های هوا می‌باشند [۱] که بدلیل ویژگی‌های ممتازشان از قبیل پاشندگی کنترل شده و خاصیت غیرخطی بسیار بالا، استفاده‌های کاربردی در مخابرات تار نوری، تار لیزری، انتقال توان بالا و حسگرهای گازی بسیار حساس در سال‌های اخیر علاقه پژوهشگران زیادی را به خود جلب نموده است [۲]. پاشندگی منحصربه‌فرد و خاصیت غیرخطی افزایش یافته در این تارها سبب شده است که مغزی PCF کاندیدای ایده‌آلی برای کاربردهای غیرخطی از قبیل تبدیل طول موجی و تغییر شکل طیف تابشی لیزری باشد. تبدیل طول موجی در تارهای نوری استاندارد، براساس پدیده غیرخطی بنام ناپایداری مدولاسیون نرده‌ای (SMI) که مبتنی بر ترکیب چهار موج است نخستین بار مشاهده و مورد بررسی قرار گرفت [۳،۴]. در این حالت برای ارضای شرط جورشدگی فازی، طول موج پمپ بایستی بسیار نزدیک به طول موج پاشندگی صفر  $(ZDW^0)$  تار و معمولاً در ناحیه پاشندگی غیرعادی انتخاب شده باشد. تزریق سیال نوری برای اهداف مختلف از جمله برای تولید طیف ابربیوستار استفاده شده است [۵،۶،۷] و در این پژوهش قصد داریم برای اولین بار تزریق سیال نوری در حفره‌های هوای غلاف برای تبدیل طول موجی در ناحیه پاشندگی عادی را شبیه‌سازی کنیم. تبدیل طول موجی به شدت به منحنی پاشندگی و بخصوص  $\beta_2$  (ضریب پاشندگی مرتبه دوم) بستگی دارد. این تبدیل طول موجی کوک‌پذیر مبتنی بر PCFهای تزریق شده با سیال کاربردهای زیادی در سیستم‌های مخابرات نوری دارد. قبلاً تبدیل طول موجی در PCFهای تزریق شده با سیال نوری در رژیم پاشندگی

Photonic Crystal Fibers<sup>۱</sup>  
Scalar Modulation Instability<sup>۲</sup>  
Zero-Dispersion Wavelength<sup>۳</sup>

$$(7) \quad g(\Omega) = \pm \frac{1}{12} \text{Im}[(\sqrt{\beta_4 \Omega^2 + 12\beta_2} \times \sqrt{\beta_4 \Omega^4 + 12\beta_2 \Omega^2 + 48\gamma P_0}) \Omega]$$

جابجایی فرکانسی، طول موج استوکس و آنتی استوکس بر اساس پارامترهای پاشندگی و غیرخطی PCF مورد نظر با استفاده از فرمول‌های بالا و شبیه‌سازی PCF در جدول‌های (۲و۱) و شکل‌های (۴و۳) آمده است.

جدول ۱: پارامترهای پاشندگی و غیرخطی PCF برای موارد مختلف سیال نوری تزریق شده با ضریب شکست‌های متفاوت در طول موج ۱۳۴۹ نانومتر در ناحیه عادی.

$n_F$	$\beta_2$ ( $ps^2/km$ )	$A_{eff}$ ( $\mu m^2$ )	$\gamma$ ( $1/W.km$ )
un infiltrated	-80.4	5.1	23.7
1.32	0.818	7.7	15.7
1.34	5.367	8.1	15
1.36	7.278	8.9	13.6
1.38	4.903	10	12.1

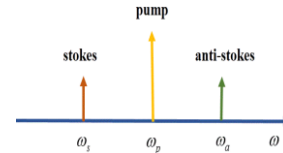
با افزایش ضریب شکست در غلاف با تزریق سیال نوری، میزان تفاوت ضریب شکست مغزی-غلاف کم و حبس-شدگی کاهش می‌یابد در نتیجه  $A_{eff}$  زیاد می‌شود. با توجه به معادله‌ی (۴) هرچه  $\beta_2$  کوچکتر باشد  $\Omega$  بیشتر می‌شود. بنابراین جابجایی فرکانسی بیشتر می‌شود. همانطور که در جدول (۱) مشخص است کمترین  $\beta_2$  را برای سیال نوری با ضریب شکست ۱,۳۲ مشاهده می‌کنیم.

جدول ۲: جابجایی فرکانسی و طول موجی تبدیل شده برای موارد مختلف سیال نوری تزریق شده با ضریب شکست‌های متفاوت در طول موج ۱۳۴۹ نانومتر در ناحیه عادی.

$n_F$	$\Omega_a$ (Hz)	$\Omega_s$ (Hz)	$\Delta\lambda$ (nm)
un infiltrated	1.3997e+15	1.3965e+15	2.4
1.32	2.433e+15	0.3616e+15	3864.4
1.34	2.1239e+15	0.6707e+15	1461.5
1.36	1.9991e+15	0.7955e+15	1020.4
1.38	1.8158e+15	0.9788e+15	576.7

شکل (۴) نمودار بهره برحسب واکوکی فرکانسی ( $\Omega$ ) را به ازای مقادیر متفاوت ضریب شکست سیال‌های نوری تزریق شده نمایش می‌دهد. مطابق شکل (۴) به ازای

فرکانس باندهای جانبی (استوکس و آنتی استوکس) بطور متقارن نسبت به فرکانس پمپ (واکوکی صفر) به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که شرط بقا انرژی برآورده شده است. یعنی  $2\omega_p = \omega_a + \omega_s$  که در اینجا  $\omega_p$  و  $\omega_a$  و  $\omega_s$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای امواج پمپ، استوکس و آنتی استوکس می‌باشد.



شکل ۳: مؤلفه‌های فرکانسی تولیدشده توسط پدیده ترکیب چهار موج.

واکوکی فرکانسی نسبت به فرکانس پمپ توسط رابطه داده شده است.

$$\Omega = \omega_p - \omega_s = \omega_a - \omega_p \quad (1)$$

$$(2) \quad \omega_s = \frac{2\pi c}{\lambda_s} \quad \text{و} \quad \omega_a = \frac{2\pi c}{\lambda_a}$$

که  $\Omega$  فرکانس زاویه‌ای باندهای جانبی و  $\lambda_s$  و  $\lambda_a$  طول موج استوکس و آنتی استوکس می‌باشند. با استفاده از شرط جورشدگی فازی  $\Omega_{Max}$  را بدست می‌آوریم.

$$k = (\beta_4/12)\Omega^4 + \beta_2\Omega^2 + 2\gamma P_0 = 0 \quad (3)$$

$$\Omega_{Max} = \pm \sqrt{-2\beta_4(3\beta_2 + \sqrt{9\beta_2^2 - 6\beta_4\gamma P_0})} / \beta_4 \quad (4)$$

که  $P_0$  توان ورودی لیزر پمپ و  $\gamma$  ضریب غیرخطی تار است. رابطه‌ی  $\beta_2$  با پاشندگی ( $D$ ) را در اینجا برای محاسبه‌ی  $\beta_2$  آورده‌ایم.

$$\beta_2 = -\frac{D\lambda_0^2}{2\pi c}$$

که  $\lambda_0$  طول موج پمپ و  $c$  سرعت نور است. ضریب غیرخطی تار ( $\gamma$ ) طبق رابطه‌ی زیر با سطح مقطع موثر مد ( $A_{eff}$ ) که از [۷] بدست آورده‌ایم رابطه‌ی عکس دارد.

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} = \frac{n_2 2\pi}{\lambda_0 A_{eff}} \quad (6)$$

که  $n_2$  در آن ضریب شکست غیرخطی است که مقدار آن برابر است با  $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} (m^2/W)$ . در نهایت شدت بهره را که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود را بدست آورده‌ایم [۹].

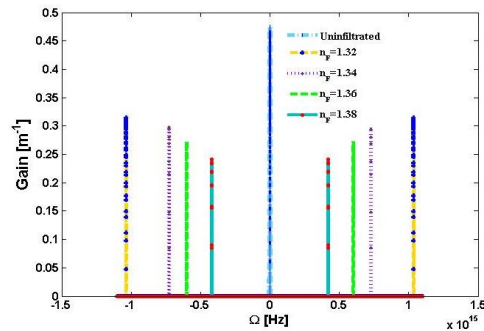
### ۳- نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار برای تغییر ناحیه‌ی طول موجی و بدست آوردن ناحیه طول موجی مورد نیاز به جای استفاده از چند PCF از یک PCF با تزریق سیال نوری با ضریب شکست‌های مختلف استفاده شد. در میان سیال‌های نوری استفاده شده، بیشترین بهره به ازای سیال نوری با ضریب شکست ۱,۳۲ اتفاق افتاد که کمترین  $\beta_2$  را شامل می‌شد و بیشترین جابجایی طول موجی ( $\Delta\lambda = 3.86 \times 10^3 \text{ nm}$ ) در آن مشاهده شد. با افزایش توان برای سیال نوری با ضریب شکست ۱,۳۲ جابجایی فرکانسی افزایش یافت و بهره در توان قله 100W بیشینه شد که به معنای دستیابی به نواحی طول موجی دورتر از طول موج پمپ است. البته با افزایش توان قله پمپ ورودی، می‌توان جابجایی طول موجی را باز هم افزایش داد و در نتیجه بازدهی و محل طول موج جدید را کنترل کرد.

### مراجع

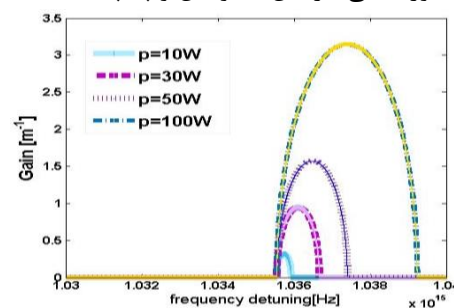
- [1] J. Leagsgaard, S. Barkou, K. Hougaard, M. Nielsen, J. Jensen and A. Bjarklev. "Dispersion Properties of Photonic Crystal Fiber \_ Issues and Opportunities". Mat. Res. Symp. Proc. VOL. 797, 2004.
- [2] C. J. Knight; "Photonic crystal fibers"; Nature 424, No. 6950, pp. 847-851, 2003.
- [3] H. Stolen. Rogers; "Phase-matched-stimulated four-photon mixing in silica-fiber waveguides"; Quantum Electronics, IEEE Journal of 11, No. 3, pp. 100-103, 1975.
- [4] Y. Ni, Zhang, L. An, J. Peng and C. Fan. "Dual-Core Photonic Crystal fibers for Dispersion Compensation". IEEE Photonic Technology Letter, VOL. 16, No. 6, 2004.
- [5] C. R. Rosberg and F. H. Bennetand D. N. Neshev and P. D. Rasmussen and O. Bang and W. Krolikowski and A. Bjarklev and Y. S. Kivshar; "Tunable diffraction and self-defocusing in liquid-filled photonic crystal fibers"; Optics express 15, No. 19, pp 12145-12150, 2007.
- [6] M. Ebnali. Heidari and F. Dehghan and H. Saghaei and F. Koochi. Kamali, and M. K. Moravvej. Farshi; "Dispersion engineering of photonic crystal fibers by means of fluidic infiltration"; Journal of Modern Optics 59, No. 16, pp 1384-1390, 2012.
- [7] M. Ebnali. Heidari and H. Saghaei and F. Koochi. Kamali and M. N. Moghadasi and M. K. Moravvej. Farshi; "Proposal for supercontinuum generation by optofluidic infiltrated photonic crystal fibers"; Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of 20, No. 5, pp 582-589, 2014.
- [8] پاکارزاده، حسن، رضوان درخشان، حامد سقایی. ۱۳۹۵. تبدیل طول موجی در تارهای بلور فوتونی تزریق شده با سیال نوری. مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران ۱۳۹۵: ۴۲۵-۴۲۸.
- [9] G. P. Agrawal; "Nonlinear fiber optics"; 5<sup>th</sup> edition, Academic press. 2007.

ضریب شکست ۱,۳۲ قله‌ی فرکانسی باندهای جانبی به بیشترین مقدار می‌رسد که این عامل به سبب کوچکی مقدار  $\beta_2$  سیال نوری تزریق شده با ضریب شکست ۱,۳۲ می‌باشد که در جدول (۱) هم به آن اشاره شد.



شکل ۴: نمودار تغییرات بهره بر حسب فرکانس در ناحیه پاشندگی عادی به ازای ضریب شکست‌های مختلف سیال نوری تزریق شده. طول PCF ۱۰ متر و توان پمپ 10 W انتخاب شده است.

حال نمودار بهره بر حسب واوکوی فرکانسی را به ازای مقادیر مختلف توان قله ورودی پمپ، برای سیال نوری با ضریب شکست ۱,۳۲ در شکل (۵) نمایش داده‌ایم. مطابق شکل با افزایش توان قله میزان بهره افزایش می‌یابد که این عامل به سبب افزایش برهمکنش غیرخطی و همچنین افزایش جورشدهی فاز بین استوکس و پمپ است.



شکل ۵: طیف بهره برای فرکانس‌های تبدیل شده در اثر SMI به ازای توان‌های مختلف پمپ برای حالت  $n_F = 1.32$  و طول ۱۰ متر از PCF در ناحیه مثبت.

در عین حال با توجه به شکل و نیز رابطه‌ی (۷) میزان  $\Omega_{Max}$  با افزایش توان افزایش می‌یابد. همانطور که ملاحظه شد میزان جابجایی فرکانسی یا بطور متعادل تبدیل طول موجی در رژیم پاشندگی عادی بسیار بیشتر از رژیم غیرعادی است، لذا برای اهداف تبدیل طول موجی و دستیابی به نواحی طول موجی دورتر، کار کردن در رژیم پاشندگی عادی مناسب‌تر است.