بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تبدیل طول‌موجی در ناحیه پاشندگی عادی براساس تارهای بلور فوتونی تزریق‌شده با سیال نوری

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

چکیده - در این مقاله، چگونگی دستیابی به محدوده‌ی طول‌موجی مناسب در ناحیه مخابراتی به وسیله تبدیل طول‌موجی در تارهای بلور فوتونی تزریق‌شده با سیال نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور یک تار بلور فوتونی با خواص پاشندگی مناسب را انتخاب و تبدیل طول‌موجی در این تار برای یک لیزر پمپ معین، از طریق فرآیند ترکیب چهار موج بررسی می‌نماییم. با تغییر ضریب‌شکست سیال نوری و تغییر خواص پاشندگی تار، می‌توان ناحیه طول‌موج تبدیل شده را تغییر داد. نتایج نشان می‌دهد برای مورد ایده‌آل، *PCF* تزریق‌شده با ضریب‌شکست ۱,۳۲ در ناحیه پاشندگی عادی دارای بیشینه جابجایی طول‌موجی است که این مقدار با افزایش توان پمپ ورودی قابل افزایش است. این مقدار بسیار بیشتر از مورد مشابه در رژیم پاشندگی غیرعادی است.

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

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.

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

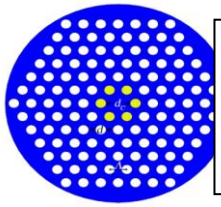
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

تارهای بلور فوتونی (PCFs[۱])، تارهای نوری با یک سطح‌مقطع ریزساختار شده از حفره‌های هوا می‌باشند [۱] که بدلیل ویژگی‌های ممتازشان از قبیل پاشندگی کنترل‌شده 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 طول‌موجی و تغییر شکل طیف تابشی لیزری باشد. تبدیل طول‌موجی در تارهای نوری استاندارد، براساس پدیده غیرخطی بنام ناپایداری مدولاسیون نرده‌ای (SMI[۲]) که مبتنی بر ترکیب چهار موج است نخستین بار مشاهده و مورد بررسی قرار گرفت [۴،۳]. در این حالت برای ارضای شرط جورشدگی فازی، طول‌موج پمپ بایستی بسیار نزدیک به طول‌موج پاشندگی صفر (ZDW[۳]) تار و معمولا در ناحیه پاشندگی غیرعادی انتخاب شده باشد. تزریق سیال نوری برای اهداف مختلف از جمله برای تولید طیف ابرپیوستار استفاده شده‌است [۷،۶،۵] و در این پژوهش قصد داریم برای اولین بار تزریق سیال نوری در حفره‌های هوای غلاف برای تبدیل طول‌موجی در ناحیه پاشندگی عادی را شبیه‌سازی کنیم. تبدیل طول‌موجی به شدت به منحنی پاشندگی و بخصوص β_2 (ضریب پاشندگی مرتبه دوم) بستگی دارد. این تبدیل طول‌موجی کوک‌پذیر مبتنی بر PCFهای تزریق‌شده با سیال کاربردهای زیادی در سیستم‌های مخابرات نوری دارد. قبلا تبدیل طول‌موجی در PCFهای تزریق شده با سیال نوری در رژیم پاشندگی غیرعادی انجام شده است [۸] و در اینجا با تزریق سیال با ضریب‌شکست‌های مختلف، خواص پاشندگی و β_2 را در رژیم پاشندگی عادی تغییر می‌دهیم و از این طریق جابجایی طول‌موجی را کنترل می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد که میزان جابجایی طول‌موجی بدست آمده در رژیم پاشندگی عادی بسیار بیشتر از رژیم پاشندگی غیرعادی است.

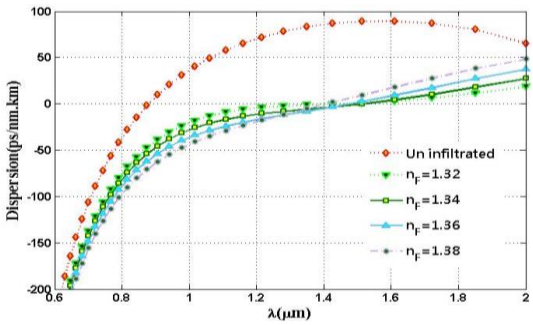
۲- مبانی نظری و نتایج شبیه‌سازی

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.



شکل۱: سطح‌مقطع یک PCF مغزی پر با شبکه شش‌ضلعی، شامل ۶ حلقه از حفره‌های هوا [۷].

در شکل ۲ پروفایل پاشندگی درPCFهای بدون ماده تزریقی و شامل ماده‌ی تزریقی با ضریب‌شکست‌های مختلف در بازه‌ی $(1.32 \le n_F \le 1.38)$ بدست آمده است [۷]. تمام شبیه‌سازی‌ها را برای طول‌موج 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.



شکل۲: مقایسه پروفایل پاشندگی بر اساس ضریب‌شکست‌های مختلف سیال نوری تزریق شده [۷].

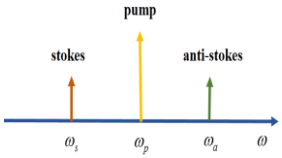
ناپایداری مدولاسیون یک طرح کلی انتشار نور در یک محیط نوری غیرخطی پاشنده می‌باشد که مطابق شکل (۳)

[۱] Photonic Crystal Fibers
[۲] Scalar Modulation Instability
[۳] Zero- Dispersion Wavelength

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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

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



شکل۳: مؤلفه‌های فرکانسی تولیدشده توسط پدیده ترکیب چهار موج.

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

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

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

که Ω فرکانس زاویه‌ای باندهای جانبی و λ_a و λ_s طول‌موج استوکس وآنتی استوکس می‌باشند. با استفاده از شرط جورشدگی فازی Ω_{Max} را بدست می‌آوریم.

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

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

که P_0 توان ورودی لیزر پمپ و γ ضریب غیرخطی تار است. رابطه‌ی β_2 با پاشندگی (D) را در اینجا برای محاسبه‌ی β_2 آورده‌ایم. (5)

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

که λ_0 طول‌موج پمپ و c سرعت نور است. ضریب غیرخطی تار (γ) طبق رابطه‌ی زیر با سطح‌مقطع موثر مد (A_{eff}) که از [۷] بدست آورده‌ایم رابطه‌ی عکس دارد.

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

که n_2 در آن ضریب‌شکست غیرخطی است که مقدار آن برابر است با $n_2 = 2.6\times10^{-20}(m^2/W)$. در نهایت شدت بهره را که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود را بدست آورده‌ایم [۹].

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

جابجایی فرکانسی، طول‌موج استوکس و آنتی‌استوکس بر اساس پارامترهای پاشندگی و غیرخطیPCF مورد نظر با استفاده از فرمول‌های بالا و شبیه‌سازی PCF در جدول‌های (۱و۲) و شکل‌های (۳و۴) آمده است.

جدول۱: پارامترهای پاشندگی و غیرخطی PCF برای موارد مختلف سیال نوری تزریق‌شده با ضریب‌شکست‌های متفاوت در طول موج ۱۳۴۹ نانومتر در ناحیه عادی.

n_F	β_2 (ps^2/km)	A_{eff} (μm^2)	γ $(1/W.km)$
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 ضریب‌شکست در غلاف با تزریق سیال نوری، میزان تفاوت ضریب‌شکست مغزی-غلاف کم و حبس‌شدگی کاهش می‌یابد در نتیجه A_{eff} زیاد می‌شود. با توجه به معادله‌ی (۴) هرچه β_2 کوچکتر باشد Ω بیشتر می‌شود. بنابراین جابجایی فرکانسی بیشتر می‌شود. همانطور که در جدول (۱) مشخص است کمترین β_2 را برای سیال نوری با ضریب‌شکست ۱,۳۲مشاهده می‌کنیم.

جدول۲: جابجایی فرکانسی و طول‌موجی تبدیل شده برای موارد مختلف سیال نوری تزریق‌شده با ضریب‌شکست‌های متفاوت در طول موج ۱۳۴۹ نانومتر در ناحیه عادی.

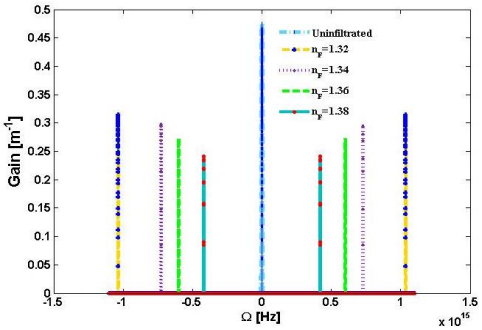
n_F	Ω_a (Hz)	Ω_s (Hz)	$\Delta\lambda$ (nm)
un infiltrated	1.3997e+15	1.3965e+15	2.4
1.32	2.433e+15	0.3616e+15	3864.4
1.34	2.1239e+15	0.6707e+15	1461.5
1.36	1.9991e+15	0.7955e+15	1020.4
1.38	1.8158e+15	0.9788e+15	576.7

شکل (۴) نمودار بهره برحسب واکوکی فرکانسی (Ω) را به ازای مقادیر متفاوت ضریب‌شکست سیال‌های نوری تزریق‌شده نمایش می‌دهد. مطابق شکل (۴) به ازای

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

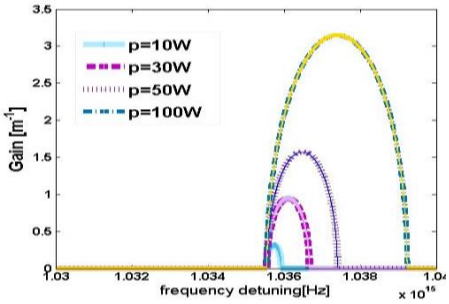
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

ضریب‌شکست ۱,۳۲ قله‌ی فرکانسی باندهای جانبی به بیشترین مقدار می‌رسد که این عامل به سبب کوچکی مقدار β_2 سیال نوری تزریق‌شده با ضریب‌شکست ۱,۳۲ می‌باشد که در جدول (۱) هم به آن اشاره شد.



شکل۴: نمودار تغییرات بهره بر حسب فرکانس در ناحیه پاشندگی عادی به ازای ضریب‌شکست‌های مختلف سیال نوری تزریق‌شده. طول PCF ۱۰متر و توان پمپ 10 W انتخاب شده است.

حال نمودار بهره برحسب واکوکی فرکانسی را به ازای مقادیر مختلف توان قله ورودی پمپ، برای سیال نوری با ضریب‌شکست 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 جورشدگی فاز بین استوکس و پمپ است.



شکل۵: طیف بهره برای فرکانس‌های تبدیل‌شده 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 Ω_{Max} با افزایش توان افزایش می‌یابد. همانطور که ملاحظه شد میزان جابجایی فرکانسی یا بطور متعادل تبدیل طول‌موجی در رژیم پاشندگی عادی بسیار بیشتر از رژیم غیرعادی است، لذا برای اهداف تبدیل طول‌موجی و دستیابی به نواحی طول‌موجی دورتر، کار کردن در رژیم پاشندگی عادی مناسب‌تر است.

۳- نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار برای تغییر ناحیه‌ی طول‌موجی و بدست‌آوردن ناحیه طول‌موجی مورد نیاز به جای استفاده از چند PCF از یک PCF با تزریق سیال نوری با ضریب‌شکست‌های مختلف استفاده شد. در میان سیال‌های نوری استفاده شده، بیشترین بهره به ازای سیال نوری با ضریب‌شکست ۱,۳۲ اتفاق افتاد که کمترین β_2 را شامل می‌شد و بیشترین جابجایی طول‌موجی ($\Delta\lambda = 3.86\times10^{3} nm$) در آن مشاهده شد. با افزایش توان برای سیال نوری با ضریب‌شکست ۱,۳۲ جابجایی فرکانسی افزایش یافت و بهره در توان قله $100W$ بیشینه شد که به معنای دستیابی به نواحی طول‌موجی دورتر از طول‌موج پمپ است. البته با افزایش توان قله پمپ ورودی، می‌توان جابجایی طول‌موجی را باز هم افزایش داد و در نتیجه بازدهی و محل طول‌موج 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. Koohi. 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. Koohi. 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.

[۸] پاکارزاده، حسن، رضوان درخشان، حامد سقایی. ۱۳۹۵. تبدیل طول‌موجی در تارهای بلور فوتونی تزریق‌شده با سیال نوری. مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران ۱۳۹۵: ۴۲۵-۴۲۸.

[9] G. P. Agrawal; “*Nonlinear fiber optics*”; 5th edition, Academic press. 2007.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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