

الملب = کلو ترمیت مدرس Tarbiat Modau University

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

تحلیل ضریب غیرخطیت در فیبر کریستال فوتونی با استفاده از روش ضریب شکست موثر تمام برداری

مريم كريمي

پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی، انتهای خیابان کارگر شمالی ، تهران

چکیده – در این مقاله ضریب غیرخطیت در فیبر کریستال فوتونی با ساختار شش گوش با استفاده از روش ضریب شکست موثر برداری به-صورت عددی تعیین شد. مقدار سطح مقطع موثر با دو روش دقیق تحلیلی و تقریب پترمن II محاسبه شد. ضریب شکست غیرخطی فیبر در یک طول موج ثابت برای مقادیر مختلف اندازه حفره و فاصله بین حفرهها محاسبه و برای دو روش با هم مقایسه شد.

کلید واژه-فیبر کریستال فوتونی، ضریب شکست موثر تمام برداری، ضریب شکست غیر خطی.

 $i-FT/\lambda$ ۱ – PACS کد

Nonlinear Coefficient Analysis of Photonic Crystal Fiber Using Fully Vectorial Effective Index Method

Maryam Karimi¹

Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, AEOI, P.O. Box 14399-51113, Tehran, Iran,

mykarimi@aeoi.org.ir

Abstract- In this paper the nonlinear coefficient of the photonic crystal fiber with hexagonal structure is determined numerically using fully Vectorial effective index method. The effective area of the fundamental mode of PCF calculated with the exact analytical relation and Petermann II approximation. The nonlinear refractive index of the fiber is calculated for different hole sizes and hole spaces at a specified wavelength.

Keywords: Photonic crystal fiber, Fully Vectorial Effective Index method, nonlinear coefficient,

PACS No: 42.81-i

۱– مقدمه

در فیبرهای نوری پرتو از یک منطقه کوچک محدود عبور می کند، بنابراین شدت نوری در این افزاره میتواند بالا باشد[؟] همچنین معمولاً پرتو مسافت قابل توجهی در فیبر منتشر میشود. به همین دلیل مطالعه اثرات غیرخطی در انواع فیبرهای نوری از اولویت تحقیق و پژوهش در این زمینه است. این اثرات میتواند به عنوان عامل محدود کننده یا بازدارند در انتقال دادههای مخابراتی باشد. همچنین از اثرات غیرخطی برای طراحی و ساخت انواع ادوات نوری مانند انواع نوسانگرهای پارامتری نوری، سوئیچهای الکتریکی، تقویت نوسانگرهای رامان و بریلوئن، منحرفکننده موجرر، نوسانگرهای ریز حلقه [۱]، لیزرهای قفل مد استفاده می-کنند [۲]. با ترکیب پاشش سرعت گروه و مدولاسیون خودفاز، میتوان پالس سولیتونی ایجاد کرد که بدون تغییر شکل در محیط انتشار یابد [۳].

فیبرهای کریستال فوتونی به دلیل ویژگیهای خاص مانند قابلیت تنظیم مشخصات اصلی فیبر، از قبیل پاشندگی، گشودگی عددی، ضریب غیرخطیت و همچنین قابلیت کنترل قطبش در این نوع فیبرها برای ساخت انواع ادوات نوری مبتنی بر فیبرهای کریستال فوتونی مناسب هستند (۴]. در این مقاله با استفاده روش ضریب شکست موثر برداری سطح مقطع موثر با روش تحلیلی دقیق و تقریب پترمن II محاسبه و سپس ضریب غیر خطیت برای مقادیر مختلف اندازه حفره و فاصله بین حفرهها محاسبه شد.

۲- روش ضریب شکست موثربرداری در تعیین غیرخطیت فیبر کریستال فوتونی

در تعیین مشخصات فیبر کریستال فوتونی با روش تمام برداری، ضرایب شکست غلاف و مغزی از معادلات انتشار تمام برداری محاسبه می شود. با حل معادلات ماکسول ضریب شکست غلاف از رابطه زیر به دست می آید [۵ و ۶]:

$$\begin{bmatrix} P_{\ell}'(U) \\ \overline{U}P_{\ell}(U) + \frac{I_{\ell}'(W)}{WP_{\ell}(W)} \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} n_{s}^{2}P_{\ell}'(U) \\ \overline{U}P_{\ell}(U) + \frac{n_{a}^{2}I_{\ell}'(W)}{WI_{\ell}(W)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{U^{2}} + \frac{1}{W^{2}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ k_{0} \end{pmatrix}^{2}$$

$$P_{\ell}(U) = J_{\ell}(U)Y_{\ell}(u) - Y_{\ell}(U)J_{\ell}(u) \int_{\ell}(u) \int_{\ell} du$$

$$P_{\ell}(U) = \frac{1}{U} \int_{\ell} du = \frac{1}{U^{2}} \int_{\ell} du$$

$$W = k_{0}a\sqrt{n_{cl}^{2} - n_{a}^{2}} \qquad U = k_{0}a\sqrt{n_{s}^{2} - n_{cl}^{2}}$$

$$W = k_{0}a\sqrt{n_{cl}^{2} - n_{a}^{2}}$$

$$W = k_{0}a\sqrt{n_{s}^{2} - n_{cl}^{2}}$$

 $u = k_0 b \sqrt{n_s^2 - n_{cl}^2}$ سریب شکست غلاف قابل دستیابی $u = k_0 b \sqrt{n_s^2 - n_{cl}^2}$ است. برای 1 = 1، ضریب شکست غلاف برای مد پایه به-دست میآید. در این عبارت، n_a ، ضریب شکست هوا، a شعاع حفره هوا و مقدار $\pi / \sqrt{3/2\pi}$ شعاع دایره خارجی سلول واحد برای شبکه شش گوش و $\pi / \sqrt{\pi}$ (معاع دایر غلری شبکه چهار گوش است [۵]. با داشتن ضریب شکست غلاف و اعمال شرایط مرزی در معادله برداری ماکسول، ضریب شکست میآید [۵ و ۶]:

 $\begin{bmatrix} J'_{\ell}(U_{eff}) \\ U_{eff}J_{\ell}(U_{eff}) \\ + \frac{K'_{\ell}(W_{eff})}{W_{eff}K_{\ell}(W_{eff})} \end{bmatrix}$ (7) $\begin{bmatrix} \frac{n_{cl}^{2}J'_{\ell}(U_{eff}) \\ UJ_{\ell}(U_{eff}) \\ + \frac{n_{eff}^{2}K'_{\ell}(W_{eff}) \\ W_{eff}K_{\ell}(W_{eff}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{U_{eff}^{2}} + \frac{1}{W_{eff}^{2}} \end{bmatrix} \left(\frac{\beta_{eff}}{k_{0}} \right)^{2}$ $U_{eff} = k_{0}\rho_{c} (n_{co}^{2} - n_{eff}^{2})^{0.5} \quad e_{eff} = k_{0}\rho_{c} (n_{eff}^{2} - n_{cl}^{2})^{0.5} \\ W_{eff} = k_{0}\rho_{c} (n_{co}^{2} - n_{cl}^{2})^{0.5} \quad W_{eff} = k_{0}\rho_{c} (n_{eff}^{2} - n_{cl}^{2})^{0.5}$ $W_{eff} = k_{0}\rho_{c} (n_{co}^{2} - n_{cl}^{2})^{0.5} \quad e_{eff} = k_{0}\rho_{c} (n_{eff}^{2} - n_{cl}^{2})^{0.5} \\ \lambda_{0} \quad \lambda_{0} = 2\pi/\lambda_{0}$ asico lumino de construction of the interval of t

$$\frac{\rho_c}{\Lambda} = C \left[\frac{d}{\Lambda} - C_3 \right] / C \left[2 \right]$$
(7)

مقدار ضریب شکست شیشه در هر طول موجی از رابطه سلمیر بهدست میآید [۴].

$$n_{s}^{2} = 1 + \sum_{i=1}^{3} \frac{\left[SA_{i} + x\left(GA_{i} - SA_{i}\right)\right]\lambda_{0}^{2}}{\lambda_{0}^{2} - \left[SL_{i} + x\left(GL_{i} - SL_{i}\right)\right]^{2}}$$
(f)

 GL_i مقدار x کسر مولی GeO_2 و GA_i ، SL_i ، SA_i و GE_2 و GL_i معادله سلمیر هستند که از مرجع [4] جایگزاری می شوند. پارامتر غیرخطیت در فیبر با رابطه زیر بهدست می آید [7]:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} \left(W^{-1} m^{-1} \right) \tag{(a)}$$

که در آن λ_0 ، طول موج پرتو انتشاری و n_2 ضریب شکست غیرخطی مرتبه دو است که با رابطه غیرخطی مرتبه دو است که با رابطه $n_2 = \frac{1}{cn_0^2 \varepsilon_0} \frac{3}{4} Re(\chi^3)$ n_2 به نوع ماده و طول موج وابسته است. مقدار عددی n_2 n_2 به نوع ماده و طول موج وابسته است. مقدار عددی n_2 در شیشه BK7 برابر BK7×10⁻²⁰ m^2/W است [۷]. سطح مقطع مدی موثر با رابطه $\pi \sigma_{PCF}^2$ تعیین می

۷۴

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

$$\varpi_{\rm eff} = \rho_c J_0 \left(U_{\rm eff} \right) \frac{V_{\rm eff}}{U_{\rm eff}} \frac{K_1 \left(W_{\rm eff} \right)}{K_0 \left(W_{\rm eff} \right)} \tag{62}$$

در رابطه (۶)، J و K به ترتیب توابع بسل مرتبه اول و دوم هستند. در تقریب پترمن II، سایز نقطهای با تقریب مد گوسی محاسبه می شود، که مشابه آن در فیبر کریستال فوتونی با رابطه زیر به دست می آید:

$$\boldsymbol{\varpi}_{1} = \boldsymbol{\rho}_{c} \left[\frac{2 \int_{0}^{\infty} E^{2}(\boldsymbol{r}) \boldsymbol{r}^{3} d\boldsymbol{r}}{\int_{0}^{\infty} E^{2}(\boldsymbol{r}) \boldsymbol{r} d\boldsymbol{r}} \right]^{1/2}$$
(V)

با توجه به شکل میدان برای مد پایه در فیبر کریستال فوتونی، سایز نقطهای از تقریب زیر بهدست میآید [۱۰]:

$$\boldsymbol{\varpi}_{2} = \sqrt{2}\boldsymbol{\rho}_{c} \left[\frac{I_{1} + I_{3}}{I_{2} + I_{4}} \right]^{2} \tag{A}$$

که در آن، I_1 ، I_2 ، I_3 و I_4 از رابطه زیر محاسبه می شوند [۱۰]:

$$I_{1} = \frac{J_{1} (U_{eff})^{2} + J_{2} (U_{eff})^{2}}{6J_{0}^{2} (U_{eff})},$$

$$I_{2} = \frac{J_{1} (U_{eff})^{2} + J_{0} (U_{eff}) J_{2} (U_{eff})}{2J_{0}^{2} (U_{eff})},$$

$$I_{3} = \frac{K_{2} (W_{eff})^{2} + K_{1} (W_{eff})^{2}}{6K^{2} (W_{eff})},$$
(9)

$$I_{4} = \frac{K_{0}(W_{eff})K_{2}(W_{eff}) + K_{1}(W_{eff})^{2}}{2K_{0}^{2}(W_{eff})},$$

با تعیین ضریب شکست سیلیکا در هر طول موج از رابطه (۴) و قرار دادن نتیجه در رابطه (۱) ضریب شکست موثر غلاف به دست میآید. در این مقاله کسر مولی x=0 و

[\] Spot Size

طول موج پرتو عبوری λ_0 ، nm ۱۵۳۰، در نظر گرفته شده است. با جایگزاری مقادیر n_{cl} در رابطه (۲)، مقادیر ضریب شکست موثر برای مد پایه انتشاری بهدست میآید. نتایج محاسبات عددی برای ضریب شکست موثر غلاف و مغزی برای مقادیر مختلف D و Λ بهترتیب در شکل (۱ الف و برای مقادیر مختلف D و Λ بهترتیب در شکل (۱ الف و ب) نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشاهده ب) نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشاهده بی میشود، با افزایش کسر پر شدگی هوا ضرایب شکست غلاف و مغزی کاهش مییابد. همچنین برای مقدار معین Λ/h ، میریب شکست برای Λ های کوچکتر مقدار کمتری دارد. در این مقاله ساختار حفرهها شش گوش فرض شده و در این مقاله ساختار حفرهها شش گوش فرض شده و

۱۳–۱۴ بهمن ۱۳۹۵



شکل ۱: تغییرات ضریب شکست مد اصلی الف- غلاف ب- مغزی بر حسب کسر پر شدگی هوا برای مقادیر مختلف ۸.

سطح مقطع مدی موثر با رابطه دقیق (۶) و تقریب پترمن رابطه (۸) با استفاده از مقادیر ضریب شکست موثر غلاف و مغزی بهدست می آید که نتایج آن بهترتیب در شکل (۲ الف و ب) نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشاهده می شود با افزایش Λ / h برای هر مقدار معین Λ ، سطح مقطع موثر روند نزولی دارد. این روند نزولی با استفاده از تقریب پترمن رابطه (۸)، سرعت بیشتری دارد. نتایج ضریب غیر خطیت در فیبر کریستال فوتونی با استفاده از رابطه دقیق (۶) و تقریب پترمن الا، بهترتیب در در شکل (۳

^r Petermann

^r Marcuse

۴- نتيجەگىرى با افزایش کسر پر شدگی هوا در فیبر کریستال فوتونی اختلاف بین ضریب شکست موثر مغزی و غلاف افزایش می-یابد که خود باعث کاهش سطح موثر مدی و افزایش ضریب غیرخطی محیط فیبر می شود. بنابراین در صورتی که هدف از طراحی فیبر کریستال فوتونی استفاده از اثرات غیرخطی در محیط فیبر باشد باید میزان کسر پر شدگی هورا را افزایش داد. به عبارت دیگر ضریب غیرخطی در فیر حفرهدار با حفرههای بزرگتر بیشتر است. در مقایسه رابطه تحلیلی دقیق با تقریب پترمن II برای محاسبه شعاع میدان مدی و در نتیجه سطح موثر مدی و ضریب غیرخطیت در فیبر کریستال فوتونی، هر دو روش روند تغییرات یکسانی را نمایش میدهند. در روش تحلیلی دقیق اختلاف بین سطح d/Λ مدی موثر برای Λ های مختلف در هر مقدار معین تقريباً يكسان است، اما در تقريب يترمن با افزايش فاصله بین حفرهها اختلاف سطح مدی بین بطور آشکار افزایش می یابد این امر موجب می شود که ضریب غیر خطیت برای های مختلف بخصوص برای مقادیر بزرگ Λ ، اختلاف Λ بسیار کمی را با هم نشان دهد.

مراجع [۱] گزارش "آثار غیرخطی در فیبرهای نوری پلیمری"، مریم کریمی، مرکز تحقیقات مخابرات، زمستان ۱۳۸۲.

- [2] K. Yamanouchi, G. Gerber, A. D. Bandrauk, "Progress in Ultrafast Intense Laser Science", Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010.
- [3] G. P. Agrawal, "*Nonlinear Fiber Optics*", Academic Press, Printed in United States of American, 2007.
- [4] M. Karimi and F. E. Seraji, Effects of geometry on amplification property of erbium doped holey fiber amplifiers using scalar effective index method, Progress In Electromagnetics Research B., Vol. 19 385-403, 2010.
- [5] M. Karimi, "Optimization of core size in erbium doped holey fiber amplifiers", Optik Vol. 125, pp. 2780–2783, 2014.
- [6] Y. F. Li, C. Y. Wang, M. L. Hu, A fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: application to dispersion calculation, Optics Communications, 238 (2004) 29–33.
- [7] S. K. Tripathy, J. S. N. Achary, N. Muduli, and G. Palai, "Nonlinear Rectangular Photonic Crystal Fiber (PCF) for Optical Communication Exclusively Super Continuum Generation", J Laser Opt Photonics, Vol. 2, 10472, 2015.
- [8] G. S. Kliros, K. C. Gota and T. P. Pikouli, "Analytical Evaluation of Splice and Bending Losses of Photonic Crystal Fibers based on Empirical Relations", 2011 3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011.
- [9] D. Marcuse, "Loss analysis of single mode fiber splices, The bell system technical journal, Vol. 56, pp. 703-7018, 1977.
- [10] G. S. Kliros, J. Konstantinidis, C. Thraskias, "Prediction of Macrobending and Splice Losses for Photonic Crystal Fibers based on the Effective Index Method", J. Wseas Transations on Commun. Vol. 5, pp. 1314-1321, 2006.

Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15



شکل ۲: سطح مقطع مدی موثر الف- رابطه (۶) ب- تقریب پترمن II. همانطور که از شکل (۳) مشاهده میشود برای هر مقدار ۸ با افزایش ۸ / *م*، ضریب غیرخطی افزایش مییابد.



شکل ۲: ضریب غیرخطیت در فیبر کریستال فوتونی با ساختار شش گوش الف- رابطه (۶) ب- تقریب پترمن **۱۱.**

با افزایش مقدار d در هر Λ ثابت، درصد هوای پر شده در غلاف فیر افزایش یافته و اختلاف بین ضریب شکست موثر غلاف و مغزی بیشتر می شود که این مورد به وضوح در شکل (۱) نمایان است. این امر به نوبه خود باعث کاهش سطح مقطع مدی موثر و در نتیجه افزایش ضریب غیر خطی می-شود.