Archive of SID



چهاردهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ۹ تا ۱۱ بهمن ماه ۱۳۸۶ 14th Conference on Optics and Photonics Rafsanjan Vali-e-Asr University, 29-31 January 2008



تحلیل اثر پارامترهای شعاع خمش، فاصله حفرههای هوا و طول موج بر ضریب شکست مؤثر فیبر کریستال فوتونی خمیده

لیلا چهرهقانی انزابی^{۱و*}، فرامرز اسمعیلی سراجی^{۲و*} و فرزاد توکل همدانی^{۳و*} ۱ ^{و ۳}گروه برق دانشگاه سمنان، ^۲ گروه نوری مرکز تحقیقات مخابرات ایران

چکیده – در این مقاله با روش ضریب مؤثر اسکالر بهینه، فیبر کریستال فوتونی خمیده را با فیبر ضریب پلهای با شرایط خمش در مختصات کارتزین مدل سازی کردهایم. مشخصات انتشاری فیبر کریستال فوتونی در این شرایط بررسی شد. در ابتدا وابستگی طول موجی ضریب شکست غلاف و ضریب شکست مؤثر محاسبه و سپس ضریب شکست مؤثر را در یک PCF خمیده با شعاع خمشهای متفاوت در محدوده شعاع خمش بحرانی و تلفات کمینه، محاسبه کردهایم. نقاطی که در آن ضریب شکست خمشی PCF مستقل از شعاع خمش بوده را محاسبه و برونیابی شده است.

> کلید واژه- روش ضریب مؤثر اسکالر بهینه، فیبر کریستال فوتونی خمیده، ضریب شکست مؤثر خمشی، شعاع بزرگ خمش بحرانی کد PACS – ۵۲۹۵ ، ۲۹۱۰، ۲۵۱۰، ۰۶۰

۱– مقدمه

فیبر کریستال فوتونی^۱، فیبر نوری است که از سیلیکای بدون ناخالصی ساخته شده است [۱]. عملکرد موجبری آنها توسط الگوی حفرههای هوای توزیع شده در ناحیه غلاف تامین میشود و این حفرهها در امتداد طول فیبر کشیده شدهاند. آرایش حفرههای هوا ممکن است نتیجه دو نوع متفاوت از اصل هدایت نور باشد: هدایت توسط بازتابش داخلی کلی اصلاح شده^۲ و اثر شکاف باند فوتونی. M-TIR مشابه با بازتابش داخلی کلی شناخته شده در فیبرهای مشابه با بازتابش داخلی کلی شناخته شده در فیبرهای استاندارد است [۲]. امروزه فیبرهای کریستال فوتونی که توسط M-TIR عمل میکنند به طور گستردهای مورد استاندارد است [۲]. در زیا نیاز به دقت کمتری در فرایند مطالعه قرار گرفتهاند، زیرا نیاز به دقت کمتری در فرایند مشاخت آنها وجود دارد [۳]. در این مقاله شعاع خمشی PCF

مؤثر اسكالر بهينه^۳ تعيين مقدار شدند.

در یک فیبر ناخمیده انتشار پالس نوری تحت یک زاویه بحرانی بهواسطه بازتابش داخلی انجام میشود. در فیبر خمیده مقدار این زاویه بحرانی افزایش مییابد [۴].

برای اولین بار با تحلیل ارایه شده، پارامترهایی از PCF را تعیین کردهایم که باعث تغییر در ضریب شکست خمشی نمی شوند.

۲- فیبر کریستال فوتونی ناخمیده

فیبر کریستال فوتونی شامل مغزی و غلاف با ضریب شکست. و معالف با ضریب شکست. $n_{cl} = n_{co} = n_s$ شکست. با دانستن $n_{cl} = n_{co}$ و $n_{co} = n_{co}$ مدی مد هدایت شده n_{eff} است. با دانستن $n_{cl} = n_{co}$ و معادل فیبر SMF به دست می آید فیبر کریستال فوتونی معادل فیبر $[\Delta]$.

^{*} ch_ghani@semnan.ac.ir, feseraji@itrc.ac.ir,

farzadtavakkol@gmail.com

¹ Photonic Crystal Fiber: PCF 2 Modified-total Internal Reflection: M-TIR

³ Modified Scalar Effective Index Method: MSEIM



مفهوم ضریب شکست مؤثر و تفاوت آن با ضریب شکست غلاف و مغزی با توجه به شکل (۱) میتواند بهتر درک شود.

در شکل (۱ الف) سطح مقطع یک فیبر کریستال فوتونی که دارای یک مغزی جامد و حفرههای هوا است نشان داده شده است. برای تعیین ویژگیهای یک PCF با روش ضریب مؤثر، بهدلیل پیچیدگی و دشواری حل مستقیم ساختار PCF، یک ضریب شکست مؤثر در نظر گرفته می-ساختار PCF، یک ضریب شکست مؤثر در نظر گرفته می-شود. برای محاسبه پارامترهای موجبری او Weff و اس شود. برای محاسبه پارامترهای موجبری او غلاف (شکل ۱ ج)، شود ناحیه با ضریب شکستهای $n_{\rm s}$ و غلاف (شکل ۱ ج)، ضریب شکستهای $n_{\rm eff}$ و $n_{\rm eff}$ و دو ناحیه با ضریب شکستهای $n_{\rm eff}$ و ا $n_{\rm cl}$ را خواهیم داشت که در آن $U_{\rm eff}$

$$U_{eff} = k_{.}\rho \sqrt{n_{s}^{r} - n_{eff}^{r}}$$

$$W_{eff} = k_{.}\rho \sqrt{n_{eff}^{r} - n_{el}^{r}}$$
(1)

ضریب شکست غلاف، n_{cl} در شکل (۲) برحسب طول موج با علامتهای *، +، 0، •، و n_{eff} با خط چین نشان داده شده است. این منحنیها برای μ_{eff} با حل چین نشان داده شده است. این منحنیها برای μ_{r} (۵/۰-۳/ مه تعداد حفرهها بیشتر است تفاضل ضریب شکست بین مغزی و غلاف بیشتر است تفاضل ضریب شکست های مؤثر و افزایش یافته است. اختلاف ضریب شکستهای مؤثر و غلاف با افزایش طول موج کاهش مییابد، به طوری که در طول موجهای بالا این اختلاف به صفر می رسد. مقدار n_{eff} حاصل مطابق شکل (۲) بین ضریب شکست مغزی و ضریب شکست غلاف قرار دارد.



Archive

شکل ۲: ضریب شکستهای غلاف و مؤثر برای ۸/۴، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۳، مکل ۲،۰ ۰/۴، . .d=۰/۴، با ۰/۴-d/۸=۰/۴،

در فیبر PCF با ضریب پلهای، $\rho = \Lambda - d/\tau$ بیانگر شعاع مغزی مؤثر بهینه است و در مقایسه با شعاع مغزی ثابت مغزی مؤثر اسکالر⁴ معمولی مورد استفاده قرار می گیرد، دقت بالاتری در محاسبات دارد [۶] و [۹].

۳- محاسبه ضریب شکست مؤثر در فیبر خمیده

فیبر خمیده را میتوان با یک فیبر ناخمیده با مشخصه ضریب شکستی معادل جایگزین کرد. مشخصه ضریب شکستی معادل توسط معادله موج اسکالر برحسب سیستم مختصات کارتزین محلی در ناحیه انحنای فیبر بهدست میآید. اگر فیبری برای مثال در جهت y خم شود، میتواند توسط یک فیبر ناخمیده با توزیع ضریب شکست مؤثر به-صورت رابطه زیر نمایش داده شود [۸].

$$n_{bent(x,y)} = n_{(x,y)} \sqrt{1 + \frac{\Upsilon y}{r_{bent}}}$$
(Y)

که در آن r_{bent} شعاع انحنای فیبر است و باید در محدوده شعاع بزرگخمش بحرانی R_c باشد تا افزایش تلفات به دلیل وجود بزرگ خمش اتفاق نیافتد. (n_(x,y) مشخصه ضریب شکست فیبر ناخمیده است.

در شکل (۳) فیبر PCF در صفحه y-z خم شده و انتشار در جهت z است.

⁴ Scalar Effective Index Method: SEIM

فيبر و پردازش علائم اپتيكى



شکل ۳: انتشار مد فیبر کریستال فوتونی خمیده در جهت z با شعاع خمش re در جهت y. خمش reat

شعاع خمش بحرانی R_c در فیبر خمیده توسط رابطه زیر تعیین میشود [۷]:

$$\mathbf{R}_{c} = \sqrt{\beta^{\mathsf{T}} - \beta_{cl}^{\mathsf{T}}} / \left(\beta - \beta_{cl}\right)^{\mathsf{T}}$$
(**T**)

شعاع بزرگخمش بحرانی برای چند ساختار متفاوت PCF با مقدارهای $\Lambda = \Lambda (\Lambda , \Lambda) = \Lambda e \Lambda (\Lambda , \Lambda) + \Lambda e \Lambda)$ شکل (۴) ترسیم شده است. با توجه به این شکل کوچک-ترین شعاع خمش که به ازای آن کمینه تلفات وجود دارد با افزایش Λ از طول موج $\Lambda /$ میکرون به $\Lambda /$ میکرون جابهجا می شود. مطابق شکل (۴) در هر Λ ثابت به ازای مقدارهای $\Lambda /$ مختلف در طول موج خاصی می توان شعاع خمش یکسانی داشت.



شکل ۴: شعاع بزرگخمش بحرانی برای چند ساختار مختلف PCF با ۸/۰، ۳/۰، ۲/۰۰/۲ و d/λ=۰/۲ م./۰۴



Arch

 Λ شکل ۵: مکان هندسی نقاط با شعاع خمش یکسان برای مقدار Λ مختلف که در آن d/Λ ثابت است.

شکل (۵) مکان هندسی نقاطی است که در آن Λ با طول موج رابطه خطی دارد و شعاع خمش بر روی آن برای مقدارهای مختلف d/Λ دارای مقدار ثابت در طول موجهای مختلف است.

مکان هندسی بهدست آمده در شکل (۵) را میتوان با رابطه زیر برازش کرد:

$$\Lambda = f/rf\lambda - \cdot/\cdot \beta \tag{(f)}$$

منحنیهای $n_{eff,bent}$ برحسب y در شکل (۶) ترسیم شدهاند. برای محاسبه ضریب شکست خمشی از دو مقدار d=1/7 و ۲، ۱/۵ $\Lambda=1/2$ و ۸/۱، $\Lambda=1/2$ استفاده کردهایم.

برای y=v در شکل (۶)، وقتی هیچ خمشی در فیبر وجود ندارد یعنی $\infty = R_c$ ، ضریب شکست مؤثر بزرگخمش برابر با ضریب شکست مؤثر فیبر ناخمیده است. در فیبر خمیده مد به بیرون مغزی در جهت خارج خمش، گسترده میشود. از آن جایی که شیب منحنی های ضریب شکست متناسب با شدت خمش است، واضح است که مد در شعاع خمش کوچکتر بیشتر مختل میشود و بیشتر به داخل غلاف کشیده میشود.



شکل ۶: ضریب شکست مؤثر در یک فیبر خمیده PCF با شعاع خمش در حد میلیمتر در جهت y برای چند d/۸ مختلف در دو طول موج ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر.

با توجه به نمودارهای شکل (۶) و جهت خمیده شدن فیبر کریستال فوتونی شکل (۵)، باید در راستای y منفی که چگالی فیبر رقیق تر است n_{eff,bent} کاهش یابد و در y مثبت که چگالی فیبر متراکم تر میشود انتظار میرود که n_{eff,bent} افزایش یابد، این وضعیت در شکل (۶) برای رابطه (۲) مشاهده می شود. منحنی ها در طول موج PCF تا ناخمیده شدهاند. خطهای افقی ضریب شکست مؤثر PCF ناخمیده را نشان می دهند.



شکل ۲: مکان هندسی نقاطی که به ازای شعاع خمشهای متفاوت در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر ضریب شکست مؤثر خمشی یکسان است.

همان طور که در شکل (۶) دیده می شود یک نقطه وجود

دارد که در آن اثرات خمشی هیچ تغییری در مقدار ضریب شکست مؤثر ایجاد نمی کند. برای مقدارهای مختلف ۸ این وضعیت در نقاط مختلف در سطح مقطع فیبر تغییراتی را نشان می دهد که می توان با رابطه چند جملهای زیر نشان داد:

Archive

$$\Lambda = -\cdot/\cdots \wedge \lambda y^{\varphi} - \cdot/\cdots \wedge y^{\Delta} - \cdot/\cdots \gamma y^{\varphi}$$
$$-\cdot/\cdot \varphi \gamma^{\tau} - \cdot/\gamma \varphi \gamma^{\tau} + \cdot/\gamma \wedge \gamma \gamma \gamma^{\tau}$$
(Δ)

در شکل (۷) رابطه (۵) برحسب y برای طول موج ۱۵۵۰ نانومتر ترسیم شده است که بر روی محور فیبر مقدار Λ بیشینه است.



شکل۸: ضریب شکست مؤثر در یک فیبر خمیده با شعاع خمش حدود میکرومتر در جهت y برای چند d/۸ مختلف در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر.

در شکل (۸) نمودار ضریب شکست موثر خمشی برحسب y برای ۸=۲/۳، ۷/۶ و شعاع خمش π۵۰μm ترسیم شده است. با افزایش ۸ تغییری در ضریب شکست خمشی PCF ایجاد نمی شود.

در مقایسه، بازه تغییرات ضریب شکست مؤثر خمشی با تغییر در ۸ در شکل (۸) بیشتر از تغییرات در شکل (۶) است.



فيبر و پردازش علائم اپتيكى

میلیمتری، ۰/۰۱۷ است. با کاهش مقدار ۸ به ۴µm تفاضل ضریب شکست خمشی به مقدار ۰/۰۰۳۷۵ کاهش یافته است. تفاضل ضریب شکست خمشی شعاع میکرونی برابر با ۱/۲ بهدست آمده است.

مراجع

- R. Buczynski, "Photonic crystal fibers", ACTA Physica Polonica, Vol. 106, No. 2, pp.141-167, 2004.
- [2] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou, and A. Bjarklev, "Photonic crystal fibers: A new class of optical waveguides", Opt. Fiber Technol., 5, pp.305-330, 1999.
- [3] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, S.E. Barkou Libori, "Macro-bending loss properties of photonic crystal fibre", Electron. Lett., Vol. 37, No. 5, 2001.
- [4] S.C. Gupta, *Textbook on optical fiber communication and its application*, ISBN 81-203-2499-4, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 2004.
- [5] S. K. Varashney, M. P. Singh, R. K. Sinha, "Propagation characteristics of photonic crystal fibers", J. Opt. Commun., Vol. 24, No.5, pp. 192-198, 2003.
- [6] R.K. Sinha, Varishney, "Dispersion properties of photonic crystal fiber comparision by scalar and fully vectorial effective index methods", Opt. Quant. Electron., DOI 10.1007/s11082-005-3196-7, pp. 711-722, 2005.
- [7] Niels Asger, Mortensen, Jacob Riis Folkenberg, "Low-loss criterion and effective area considerations for photonic crystal fibres", J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Vol. 5, 2003.
- [8] J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, V. Finazzi, D. J. Richardson, "Understanding bending losses in holey optical fibers", Opt. Commun., Vol. 227, pp. 317-335, 2003.
- [9] F.E. Seraji, M.Rashidi, V.Khasheie, "Parameter analysis of a photonic crystal fiber with raised-core index profile based on effective index method", Chinese Opt. Lett., Vol. 4, No. 8, 2006.



شکل ۹: ضریب شکست مؤثر فیبر PCF خمیده و ناخمیده برحسب d/λ برای چند d/A متفاوت در شعاع خمش ۳۰۰ میکرون.

 d/λ در شکل (۹) ضریب شکست مؤثر خمشی برحسب d/λ و در ترسیم شده است. این منحنیها برای $\Lambda=7/8~\mu$ و در بازه شعاع خمش ۳۰۰ میکرون برای چند d/Λ متفاوت در بازه طول موجی ۵۰۰ نانومتر تا ۲۵۰۰ نانومتر با رفتاری نزولی ترسیم شده است. خطهای افقی ضریب شکست مؤثر فیبر کریستال فوتونی ناخمیده را نشان میدهد. با افزایش قطر مورهها یعنی برای مقدارهای مختلف Λ/h ، مقدار $n_{eff,bent}$ مقدار بیشتری خواهد داشت.

۴- نتیجهگیری

در این مقاله، با روش ضریب مؤثر اسکالر بهینه، شعاع بزرگخمش بحرانی برحسب طول موج برای مقدارهای مختلف ۸ فیبر کریستال فوتونی ترسیم شده و فرکانس-هایی را یافتیم که در آنها شعاع خمش به مقدار ۸/۵ بستگی ندارد. همچنین ضریب شکست مؤثر در یک PCF ناخمیده و خمیده بهدست آمده و منحنیهای آن برحسب شعاع فیبر، طول موج و ۸/۵ ترسیم شده است.

در تحلیل شعاع خمش بحرانی نشان داده شد مکان هندسی نقاطی که در آن ۸ با طول موج رابطه خطی دارد، شعاع خمش بر روی آن برای مقدارهای مختلف ۸/۸ دارای مقدار ثابت در طول موجهای مختلف است. همچنین در تحلیل ضریب شکست مؤثر خمشی نشان داده شد که مجموعه نقطههایی در سطح PCF وجود دارد که در آنها اثرات خمشی هیچ تغییری در مقدار ضریب شکست مؤثر خمشی در فیبر کریستال فوتونی ایجاد نمی کند.

تفاضل ضریب شکست خمشی با Λ=۷/۶μm در شعاع خمش