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

طراحی و شبیه سازی حسگر دما و کرنش با استفاده از انواع فیبرهای بلور فوتونی بر مبنای اثر پراکندگی بریلیونی

سید مجید موسوی، سعید گل محمدی هریس

دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین دانشگاه تبریز

چکیده- در این پژوهش مطالعه‌ای بر انواع و ساختار فیبرهای نوری انجام شده و پراکندگی بریلیون مورد توجه قرار گرفته است. کاربرد حسگری فیبرهای نوری در زمینه دما و کرنش و نحوه استنباط این پارامترها با استفاده از پراکندگی بریلیون مد نظر این پروژه می‌باشد. پس از مطالعه حسگری فیبرهای نوری با استفاده از پراکندگی بریلیون، فیبرهای کریستال فوتونی برای رسیدن به بهینه‌ترین سیستم و بالاترین دقت اندازه‌گیری با استفاده از نرم افزار *comsol* و *matlab* طراحی گردیده و در نهایت مشخص گردید که حساسیت دمایی فیبرهای کریستال فوتونی نسبت به فیبرهای معمولی تفاوت چندانی ندارند، اما حساسیت کرنش آنها به میزان ۲۰ درصد با طراحی خاص قابل افزایش می‌باشد. پارامترهای مختلفی مثل قطر حفره، ثابت شبکه و طول موج نور ورودی در این میزان حساسیت دخالت دارند که با بررسی اثر هر کدام از این عوامل بهینه‌ترین حالت برای فیبر کریستال فوتونی حداکثر ثابت شبکه (۷,۷۵میکرون) و حداقل قطر حفره (۰,۷۷۵میکرون) و طول موج پایین ۱,۳۲ میکرون می‌باشد.

کلید واژه- پراکندگی بریلیون، حسگر دما، حسگر کرنش، فیبر کریستال فوتونی.

Design and simulation of Temperature and Strain Sensors Using Photonic Crystal Fibers Based on Brillion Scattering

Saeed Gholmohammadi Haris, Seed Majid Mousavi

Tabriz University

Abstract In this thesis, we study on type and structure optical fiber and one of the important scattering inside fiber, Brillouin scattering. Optical fiber has special properties such as high flexibility, immune to electromagnetic interference so has distributed application in different field such as sense.
In this work, we attention to optical fiber sensor in domain temperature and strain with Brillouin scattering. With improvement optical fiber appearing photonic crystal fiber that has complex structure and best efficiency.
We with Comsol and Matlab software design optimum photonic crystal fiber for temperature and strain sensor. Finally after test and simulation, temperature sensitivity in photonic crystal fiber no different with SMF fiber, but strain sensitivity about 20 percent increase in PCF in comparison with SMF fiber.
Different parameter has effect on this result such as pitch (Λ)-7.75µm-, hole size(d) -0.775µm- and wavelength(λ). Best sensitivity is for maximum pitch and minimum hole size and wavelength 1.32µm.

Keywords: Brillouin scattering ,Temperature sensor, Strain sensor, photonic crystal fiber.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

در ساختارهای فیبر نوری کلا دو نوع فیبر داریم. فیبرهای هسته سیلیکا که دارای هسته، پوسته و محافظ هستند و فیبرهای کریستال فوتونی که دارای هسته‌ی جداگانه‌ای نیستند، بلکه حفره‌های خالی داخل فیبر تشکیل هسته می-دهند که امکان انتقال سیگنال با توان بالا را فراهم می‌سازند. مهمترین کاربرد فیبرهای نوری اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی در محیط مثل دما، فشار، کرنش، غلظت مواد، میدان الکتریکی و... می‌باشد. لذا حسگری با اهمیت ترین کاربرد فیبرهای نوری است. پدیده پراکندگی یک پدیده فیزیکی درون فیبری است که در سال ۱۹۵۷ توسط فابلنسکی[1] مشاهده گردید. که به علت‌های مختلف چون عدم یکنواختی چگالی ماده، شکست فیبر، تغییر ضریب شکست در نواحی ماده و... رخ می‌دهد.با اندازه‌گیری میزان پراکندگی در نقطه‌ای از فیبر می‌توان پارامترهای فیزیکی ذکر شده را اندازه‌گیری کرد. پراکندگی بریلیون یکی از پراکندگی‌ها غیر الاستیک در فیبر است که از تغییر ضریب شکست ماده به علت انتشار موج فشار (آکوستیک) درون فیبر نشات می‌گیرد. این موج فشار می‌تواند به علت تغییر دما یا اعمال کرنش و فشار در نقطه‌ای از فیبر باشد[2]. پراکندگی بریلیون یک پدیده غیر خطی است که در دو حالت خودبه‌خودی و القایی اتفاق می‌افتد. در رنج دمایی -۴۰ تا +۹۰ شیفت فرکانسی بریلیون به صورت خطی با دما و کرنش افزایش می‌یابد. وابسته به طول موج‌های مختلف شیب این رابطه متفاوت می‌شود- طبق رابطه اعلام شده-. در طول‌موج ۱۵۵۰ نانومتر ضریب دمایی ۱,۱۵ مگاهرتز به ازای هر درجه دمایی است. ضریبی که برای کرنش در این منبع اشاره می‌شود برابر۵۰۵,۵ مگاهرتز به ازای یک درصد کرنش است.

۲- معادلات ریاضی

تغییر دما یا اعمال کرنش در نقطه‌ای از فیبر موجب ایجاد یک موج نوسان در محدوده‌ی فرکانس آکوستیک در ضریب شکست فیبر می‌شود. نور ورودی با رسیدن به این نقطه با موج آکوستیک برخورد کرده و اندرکنش نشان می‌دهد، لذا مقداری از آن به صورت موج استوکس پراکنده می‌شود. بدیهی است که این موج پراکنده شده هم فرکانس با موج ورودی نیست بلکه به اندازه فرکانس بریلیون دچار شیفت می‌شود که این مقدار از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$\nu = \frac{2nVa}{\lambda} \qquad (۱)$$

در این رابطه ν شیفت فرکانسی بریلیون،n ضریب شکست فیبر، Va سرعت موج آکوستیک و λ طول موج نور ورودی است. سرعت موج آکوستیک (۸) و ضریب شکست ماده(۴) به دما و کرنش وابسته هستند، لذا با تغییر دما و کرنش شیفت فرکانسی بریلیون نیز دچار تغییر می‌شود.[3]

پراکندگی نور نوعی اختلال موج است که از معادله ماکسول(۲) قابل دستیابی است.

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \qquad (۲)$$

در این معادله P پلاریزاسیون میدان است که توسط دوقطبی الکتریکی القا می‌شود و اثرات دی‌الکتریک را روی انتشار موج مدل می کند، c سرعت نور در خلاء است، E میدان الکتریکی و μ0 ضریب مغناطیسی خلاء است.اگر نور در یک ناحیه خطی منتشر شود، رابطه P و E در محیط‌های غیر همگن مطابق معادله(۳) است.

$$P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E + \varepsilon_0 \Delta\chi^{(1)} E = P_0 + P_d \qquad (۳)$$

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_T \Delta\rho + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial T}\right)_\rho \Delta T \qquad (۴)$$

از آنجایی که تغییرات چگالی با تغییرات فشار ارتباط دارد لذا قسمت اول معادله(۴) که تفسیر کننده پراکندگی بریلیون درون فیبر است، به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_s \Delta P \qquad (۵)$$

در تعادل گرمایی، فونون های گرمایی تولید شده منبع اصلی تغییرات فشار می‌باشند. این تغییرات فشار منجر به جابه‌جایی اندک مولکول‌ها درون محیط شده و در نتیجه یک چگالی محلی در ماده ایجاد می‌شود. اگر این تغییرات چگالی خیلی کم باشد، از دید ماکروسکوپی فیبر بدون تغییر باقی می-ماند[6].نوسانات چگالی به صورت متناوب از طریق تابع (۶)بیان می‌شود:

$$\Delta\rho = 1/2\left[A(z,t)e^{j(\omega_B t - k_B r)} + A^*(z,t)e^{-j(\omega_B t - k_B r)}\right] \qquad (۶)$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

ω_B و k_B به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و بردار موج ، موج آکوستیک هستند. معادله موج د.آلمبرت[1] نوسانات چگالی به صورت زیر بیان می‌شود[6]:

$$\nabla^2 P - \frac{\rho}{K}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \qquad (۷)$$

در این معادله ρ چگالی ماده و K ضریب تراکم پذیری جسم (مدول جسم)هستند. با حل معادله فوق سرعت موج فشار حاصل می‌شود:

$$V_a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \qquad (۸)$$

موج الکترومغناطیس تک فام با بردار موج k_0 و فرکانس زاویه‌ای ω_0 به صورت معادله(۹) است:

$$E = 1/2\left[E_0(z,t)e^{j(\omega_0 t - k_0 r)} + E_0^*(z,t)e^{-j(\omega_0 t - k_0 r)}\right] \qquad (۹)$$

در حضور همزمان موج الکترومغناطیس و آکوستیک، پلاریزاسیون بدست می آید.

$$\vec{P}_d(r,t) = \Delta\varepsilon\vec{E}(r,t) = \frac{\gamma_e}{\rho_0}\Delta\rho(z,t)\vec{E}(r,t) \qquad (۱۰)$$

با جایگذاری معادلات موج نور ورودی و آکوستیک در معادله (۱۰) داریم:

$$P_d = e_p \frac{\gamma}{4\rho_0} \left[(\omega_0+\omega_B)^2 A E_0 e^{j((\omega_0+\omega_B)t-(k_0+k_B)r)} + (\omega_0-\omega_B)^2 A^* E_0 e^{j((\omega_0-\omega_B)t-(k_0-k_B)r)}\right] \qquad (۱۱)$$

همانطوری که مشاهده می‌شود اختلال باعث می‌شود پلاریزاسیون Pd مولفه‌های فرکانسی جدیدی در $(\omega_0+\omega_B)$ و $(\omega_0-\omega_B)$ پیدا می‌کند که به آنها موج استوکس در فرکانس‌های پایین و آنتی استوکس در فرکانس‌های بالا در شرایط جفت‌شدگی فاز، اطلاق می‌شود[3]. دلیل اصلی پراکندگی بریلیون، تولید این دو فرکانس در موج برگشتی است.

به ازای تغییر دما، تغییر شیفت فرکانسی بریلیون با دما در فیبرهای کریستال فوتونی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \nu_B}{\partial T} = \frac{2}{\lambda_p}\left[V_A\frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff}\frac{dV_A}{dT}\right] \qquad (۱۲)$$

طبق قانون پراکندگی مواد که توسط رابطه سلمیر[2] بیان می‌شود: داریم[7]:

$$n^2(\lambda,T) - 1 = \sum_{i=1}^{3}\frac{S_i(T)\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2(T)} \qquad (۱۳\text{-الف})$$

$$S_i(T) = \sum_{j=0}^{4} S_{ij}.T^j \quad \lambda_i(T) = \sum_{j=0}^{4}\lambda_{ij}.T^j \text{ و} \qquad (۱۳\text{-ب})$$

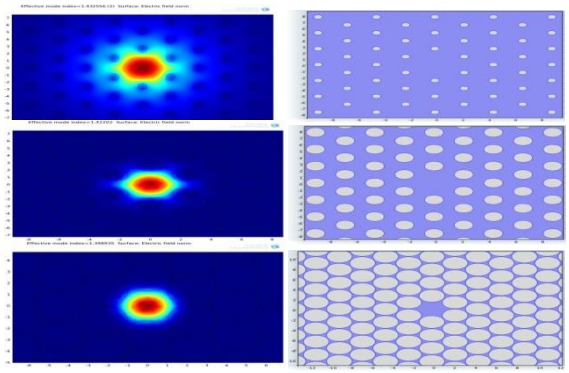
که در آن S_i مقاوت رزونانسی ماده در طول موج λ_i است.

۳- نتایج شبیه سازی

ویژگی‌های ذاتی ماده تابعی از دما و کرنش هستند. به این معنی که با تغییر پارامتر خارجی مثل دما و کرنش، شیفت فرکانسی بریلیون از طریق سرعت موج آکوستیک دچار تغییر می‌شود. این مفهوم به وضوح در رابطه(۱۴) نمایان است[۵]:

$$V_a = \sqrt{\frac{E(1-k)}{(1+k)(1-2k)\rho}} \qquad (۱۴)$$

که در آن Eمدول یانگ[3] و k ضریب پواسون[4] ماده هستند. هرکدام از پارامترهای مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی با



شکل۱: هندسه PCF برای قطر حفره های مختلف و ثابت شبکه ثابت۲,۵۸ میکرون(راست)، توزیع میدان الکتریکی در تک مد(چپ)

دما ارتباط دارند،[8] لذا سرعت موج آکوستیک به صورت غیر مستقیم با دما در ارتباط می‌باشد.

[1] D.Alembert wave equation

[2] sellmeier

[3] Young modulus

[4] Poisson ratio

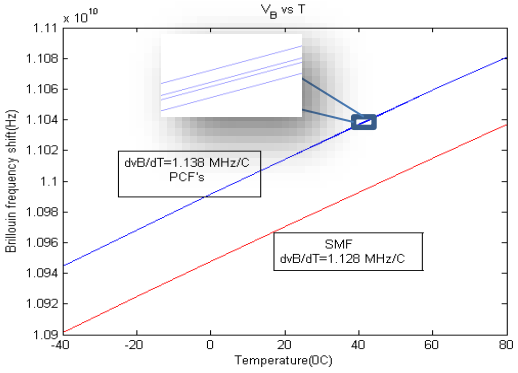
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

شکل (۱) شبیه سازی فیبر بلور فوتونی برای ثابت شبکه ۲,۸۵میکرون و طول موج ۱,۵۵میکرون را نشان می دهدو در این شبیه سازی قطر حفره به عنوان متغییر با مقادیر ۰,۶۴۵- ۲,۴۵۱-۱,۴۱۹ میکرون (از بالا به پایین) در نظر گرفته شده است.

در نتیجه تغییرات شیفت فرکانسی بریلیون با دما به شکل (۲) حاصل می‌شود. این شکل نتایج را برای چهار نوع فیبر بلور فوتونی با ثابت شبکه ها -۷,۷۵-۳,۱-۲,۲۱۵ و ۱,۸۲۳۵ میکرون- و فیبر معمولی را نشان می دهد.

رابطه شیفت فرکانسی بریلیون با کرنش مطابق رابطه (۱۵) است.

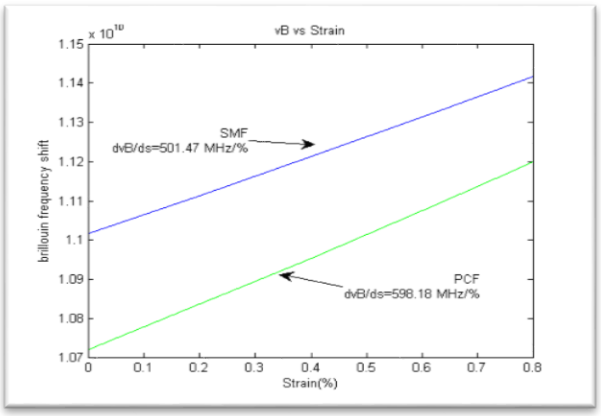


شکل۲: حساسیت دمایی شیفت فرکانسی بریلیون در فیبرهای کریستال فوتونی و فیبر معمولی

$$C_s' = \frac{1}{\nu_B}\frac{\partial \nu_B}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{V_A}\frac{\partial V_A}{\partial \varepsilon} \qquad (۱۵)$$

$$\left.\frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon_s}\right|_{\lambda_r} = n_{eff} + c_\varepsilon^n \frac{\partial n_{co}}{\partial n_r} \qquad (۱۶)$$

با به دست آوردن ارتباط ضریب شکست و سرعت آکوستیک با کرنش (۱۶) در منابع[4] ضریب نمودار شیفت فرکانسی بریلیون با کرنش برابر با ۵۰,۵۵ کیلو هرتز به ازای یک میکرون کرنش است. فیبرهای کریستال فوتونی به دلیل وجود پارامترهای ثابت شبکه و قطر هسته و قطر حفره دارای انعطاف بالایی در تشکیل ساختار هستند. لذا با تغییر این پارامترها و رسم حالت های مختلف بهینه ترین حالت حاصل می شود. با رسم نمودار شیفت فرکانسی بریلیون برای PCFبا ثابت شبکه های مختلف و مقایسه آن با فیبر معمولی داریم،شکل(۳)برای ثابت شبکه ۷,۷۵ میکرون و قطر حفره ۰,۷۷۵ میکرون و طول موج ۱,۳۲ میکرون میزان حساسیت کرنش از ۶۱۵,۲ به ۷۲۲,۵ مگاهرتز افزایش می‌یابد.



شکل۳: حساسیت کرنش فیبرکریستال فوتونی و فیبر معمولی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله حساست دمایی و کرنش فیبرهای معمولی و فیبرهای کریستال فوتونی مورد بررسی قرار گرفت که مشاهده گردید که با افزایش ثابت شبکه و کاهش قطر حفره و طول موج نور ورودی می توان فیبرکریستال فوتونی را به دست آورد که هرچند از نظر حساسیت دمایی با فیبر معمولی تفاوت چندانی ندارد ولی حساست کرنش آن به ازای نسبت ثابت شبکه به قطر حفره ۰,۱، به میزان ۲۰ درصد افزایش می یابد که برای اندازه گیری کرنش های میکروسکوپی بسیار کارایی دارد.

منابع

[1]- Foaleng S. M., Rodríguez F., Martin Lopez S., González Herráez M., Thévenaz L.,. *Impact of self phase modulation on the erformance of Brillouin distributed fibre sensors*. Optics etters, 36, 2:97-99.2011

[2]- A. L. Gaeta and R. W. Boyd,. "*Stimulated Brillouin scattering in the presence of external feedback*", Int. J. Nonlinear Opt. Phys., vol. 1, no. 3, pp. 581-594.1992

[3]- Minardo, A. 2004. *Fiber-optic distributed strain/temperature sensors based on stimulated Brillouin scattering*. SECONDA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI.2004

[4]- Culverhouse, D.; Farahi, F.; Pannell, C.N.; Jackson, D.A.. *Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors*. Electron. Lett, 25, 913-915.1989

[5]- Bao, X.; Webb, D.J.; Jackson, D.A, *22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber*. Opt. Lett, 18, 552-554.1993

[6]- Facchini, M. *Distributed optical fiber sensors based on brillouin scattering*. EPFL. THÈSE NO 2521.2001

[7]- Leviton,D.B.and Frey,B.J. *Temperature-dependent absolute refractive index measurements of synthetic fused silica*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771.

[8]- Coelho,J.M.P. Nespereira,M. Abreu,M. and Rebordão.J. *3D Finite Element Model for Writing Long-Period Fiber ratings by CO2 Laser Radiation. Sensors*, 13, 10333-10347; doi:10.3390/s130810333.2013

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]