

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

شبیه سازی حسگر توری براگ فیبر با روش ماتریس انتقالی

آتوسا عطاپور^۱، محمد سروش^۲، اصغرابراهیمی^۳

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، گروه برق الکترونیک، بوشهر، ایران، atosa.atapour@gmail.com

^۲دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران m.soroosh@scu.ac.ir

^۳دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، گروه برق الکترونیک، بوشهر، ایران ebrahimi@mut.ac.ir

۱- چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش ماتریس انتقالی به شبیه سازی حسگرهای دما و کرنش مبتنی بر توری براگ فیبر پرداخته شده است. توری به بخش های کوچک تقسیم می شود و برای هر بخش براساس میدانهای ورودی و خروجی یک ماتریس 2×2 تعریف می شوند. با حاصلضرب این ماتریسها در هم یک ماتریس کلی 2×2 به دست می آید و می تواند طیف بازتابی و انتقالی توری را نشان دهد. براساس تغییر دوره تناوب و ضریب شکست توری ناشی از تغییر دما و کرنش شبیه سازی حسگرهای دما و کرنش مبتنی بر توری براگ یکنواخت و اپودایز شده گوسی ارائه شده است. کلیده واژه: حسگر توری، حسگر دما، حسگر کرنش، توری براگ فیبر، ماتریس انتقال

۲- مقدمه

توری براگ فیبر^۱ (FBG) در سال های اخیر مورد توجه پژوهش گران زیادی قرار گرفته است و می تواند به عنوان یک ابزار کارا برای کاربردهای حسگری بکار رود [۱ و ۲]. FBGها در سامانه های مخابراتی جایگاه ویژه ای دارند که از آن جمله چندگانه سازی تقسیم طول موج^۲ و جبران پاشندگی^۳ می توان اشاره کرد [۳]. از آنجایی که فیبرهای نوری به طور اساسی از تداخل های الکترومغناطیسی [۴] ایمن هستند می توان از آنها در محیط هایی که سیم کشی مسی نمی تواند مورد استفاده قرار گیرد، استفاده کرد. FBGها در فیبرهای نوری سیلیکایی ساخته می شوند که دارای محدودیت هایی مربوط به شکنندگی، ضرایب دمایی و کرنش کم هستند. این محدودیت ها می توانند با بکاربردن فیبرهای نوری پلیمریج [۲] کاهش یابند. فیبرهای نوری پلیمری با انعطاف پذیری بیشتر کاربرد حسگری فیبرهای نوری را بیش از پیش فراهم می کنند [۶ تا ۸]. یکی از مسائل مهم و مورد توجه در حسگرهای توری براگ فیبر اندازه گیری و تشخیص همزمان پارامترهای محیطی مورد اندازه گیری است. روشهای بسیاری برای اندازه گیری و جداسازی پارامترهای محیطی مانند دما و کرنش ارائه شده است [۹ تا ۱۵].

۳- تئوری توری براگ فیبر

انتشار موج در توری های فیبر با استفاده از تئوری مد جفت شده با حل معادلات ماکسول و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب، تحلیل می شود. معادلات موج، معادلات دیفرانسیل جزئی مرتبه ی دوم خطی برای بردارهای میدان مغناطیسی و الکتریکی هستند. هر جوابی که در معادله ی موج صدق کند و شرایط مرزی استوانه ی مقتضی فیبر را در مرز هسته و روکش ارضا کند، یک مد فیبر است. اگر در موجبر نوری هیچ آشفنگی وجود نداشته باشد، این مدها بدون جفت شدگی منتشر می شوند. اگر موجبر دارای یک آشفنگی مانند تغییر در ضریب شکست باشد جفت شدگی مدهای انتشاری می توان رخ دهد. برای حل چنین مسائلی معمولاً از تئوری مد جفت شده استفاده می شود [۶ و ۱۷]. این روش یک مجموعه از معادلات دیفرانسیل مرتبه ای برای تغییر در دامنه ی میدان ها در امتداد فیبر را فراهم می کند که برای آشفنگی های مختلف قابل شبیه سازی است.

یک توری پیچیده می تواند به صورت چندین بخش کوچک متوالی تقسیم شود که هر کدام دارای یک دوره تناوب و فاز ثابت و مدولاسیون ضریب شکست منحصر به فرد هستند. بنابراین با مدلسازی مشخصه های انتقالی توریهای براگ و استفاده از روش ماتریس انتقالی یک روش ساده و سریع برای تحلیل ساختارهای پیچیده به دست آید.

[۱۶ و ۱۷]

^۱ Fiber Brag Grating (FBG)

^۲ Wavelexgti Division Multiplexixy (WDM)

^۳ Dispersion compensation

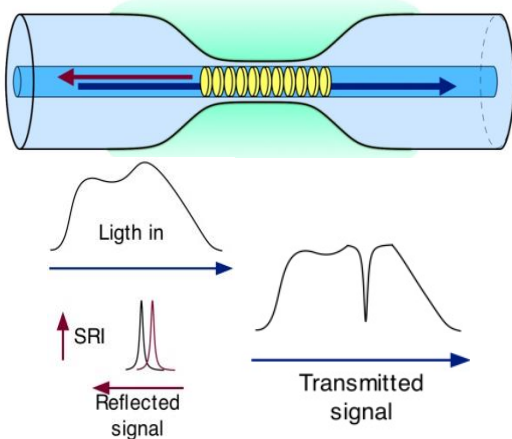
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

رابطه (۳-۴) ضریب شکست مؤثر توری را بیان می کند.

(۳-۴)

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}(z)} \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Phi(z) \right] \right\} = \overline{\delta n_{eff}(z)} + \frac{v \overline{\delta n_{eff}(z)}}{2} (e^{+i(Kz+\Phi(z))} + e^{-i(Kz+\Phi(z))})$$

$\delta n_{eff}(z)$ متوسط تغییر ضریب شکست مؤثر dc در طول یک دوره تناوب توری، v میدان دید توری است که مقدار آن می تواند بین صفر تا یک تغییر کند. Λ دوره تناوب توری براگ، $k=2\pi/\Lambda$ عدد موج و $\Phi(z)$ چرخش توری است. اگر پارامترهای $\delta n_{eff}(z)$ ، v ، Λ و $\Phi(z)$ مقادیر ثابتی داشته باشند توری یکنواخت است در غیر این صورت توری غیر یکنواخت نامیده می شود. شکل ۳-۳ توری براگ فیبر را نشان می دهد که با ایجاد یک آشفتگی متناسب در ضریب شکست هسته فیبر نوری در امتداد محور آن، با دوره تناوبی معلوم ساخته می شود. توری باعث می شود که فاز یا شدت موج نور بازتابی یا انتقالی تغییر کند. هنگامی که طیف گسترده ای از پرتو نور به توری براگ تابانده می شود بخشی از انرژی آن انتقال می یابد و بخش دیگر بازتاب می شود. [۵]



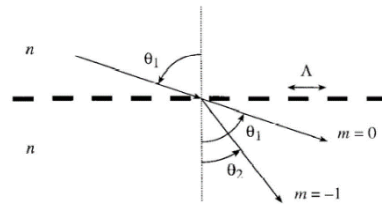
شکل ۳-۳. طرحی از یک توری براگ فیبر یکنواخت که تنها طول موج نور شرط براگ را برآورده می کند و بازتاب می شود.

بر اثر وجود آشفتگی در ضریب شکست هسته ی فیبر نوری بین مدها جفت شدگی رخ می دهد. تئوری جفت شدگی حد ابزاری مؤثر برای شبیه سازی و تحلیل طیفی توری های براگ فیبر است که در مراجع [۱۶ و ۱۷] به صورت کامل ارائه شده است.

یک توری براگ را توری پراش نیز می توان نامید. موج تابشی که با زاویه ی θ_1 به توری تابیده می شود در اثر پراش با رابطه ی (۳-۱) در نظر گرفته می شود. [۱۶]

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (۳-۱)$$

در این رابطه، θ_2 زاویه ی موج پراش شده و m مرتبه ی پراش است. شکل ۳-۱ مفهوم پراش را نشان می دهد.



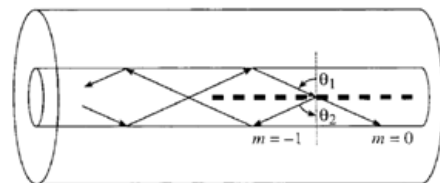
شکل ۳-۱ پراش یک موج نور توسط توری

شکل ۳-۲ بازتاب یک مد توسط یک توری براگ با زاویه ی پراش θ_2 را نشان می دهد. در این شکل نور با زاویه ی $\theta_2 = -\theta_1$ بازتابیده شده در جهت مخالف حرکت می کند. ثابت انتشار مد (β) پارامتری است سرعت انتشار موج با طول λ را بیان می کند و با رابطه ی (۳-۲) تعریف می شود.

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) n_{eff} \quad (۳-۲)$$

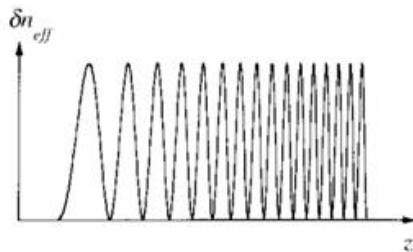
اگر β_1 و β_2 به ترتیب ثابت انتشار موجهای رفت و برگشت باشد می توان ارتباط آنها را با رابطه ی (۳-۳) نشان داد.

$$\beta_2 = \beta_1 - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (۳-۳)$$



شکل ۳-۲ شمایی از تابش و بازتابش یک مد در توری براگ

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



(د)

شکل ۳-۴ نمونه‌هایی از تغییر ضریب شکست در امتداد محور فیبر، (الف) توری یکنواخت، (ب) توری اپودایز شده با تابع گوسی، (ج) توری اپودایز شده با تابع کسینوسی برجسته و (د) توری چرپ شده [۱۶].

تغییر ناگهانی در ابتدا و انتهای یک FBG یکنواخت باعث می‌شود که در طیف بازتابی توری لبه‌های جانبی شبیه به تابع سینک حاصل شود. لبه‌های جانبی می‌توانند با تغییر دادن تدریجی ضریب شکست در ابتدا و انتهای توری از بین بروند که این موضوع به عنوان اپودایزیشن توری شناخته می‌شود. در واقع اگر مقدار متوسط تغییر ضریب شکست مؤثر در همه‌ی دوره تناوب‌های توری ثابت باشد، توری یکنواخت است در غیر این صورت با تابعی اپودایز شده که تغییرات آن را توصیف می‌کند [۱۶]، [۱۷].

۴- نتایج شبیه سازی

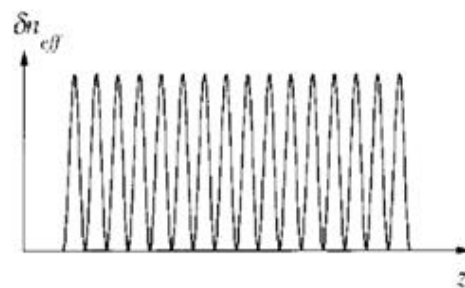
در این بخش به ارائه‌ی نتایج به دست آمده از شبیه سازی توری براگ یکنواخت ایجاد شده در فیبرهای تک مد برای فیبر سیلیکینی پرداخته شده است. سپس با استفاده از این نتایج حسگرهای توری براگ برای سنجش دما و کرنش شبیه سازی شده است.

در ادامه به شبیه سازی نمونه هایی از توری های براگ و ویژگیهای مختلف آنها پرداخته شده است.

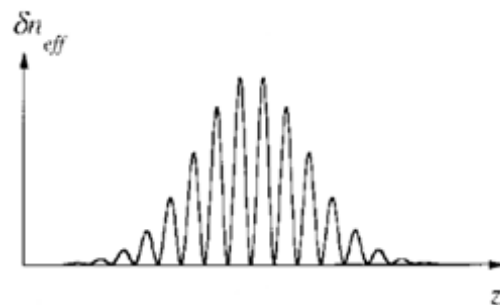
تمام مراحل شبیه سازی با برنامه نویسی در محیط Matlab انجام شده است.

برای شروع شبیه سازی، توری به ۱۰۰ بخش مشابه تقسیم می‌شود. هر بخش در واقع به صورت یک توری یکنواخت با پارامترهای مربوط به مدولاسیون ضریب شکست و دوره تناوب ثابت در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از ماتریس انتقال توصیف کننده‌ی هر بخش و محاسبه‌ی پارامترهای مورد نیاز براساس رابطه اخیر، پاسخ طیفی هر کدام از بخش های کوچک مجزا را به دست آورده و با بهره گیری از

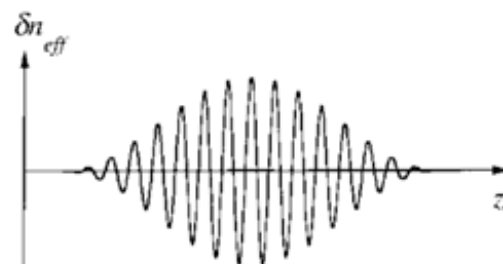
شکل ۳-۴ نمونه‌هایی از تغییر ضریب شکست توری براگ مانند توری یکنواخت، اپودایز شده با تابع گوسی، اپودایز شده با تابع کسینوسی برجسته و چرپ شده را نشان می‌دهد. برای گویایی و شفاف سازی اندازه‌ی دوره تناوب نسبت به طول توری به طور اغراق آمیزی نشان داده شده است.



(الف)

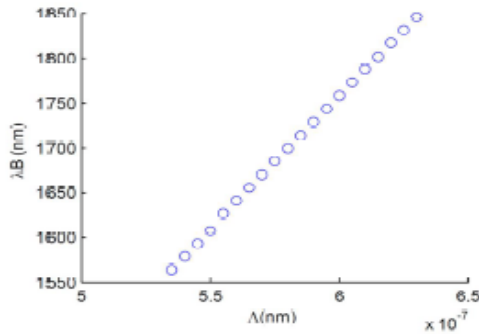


(ب)



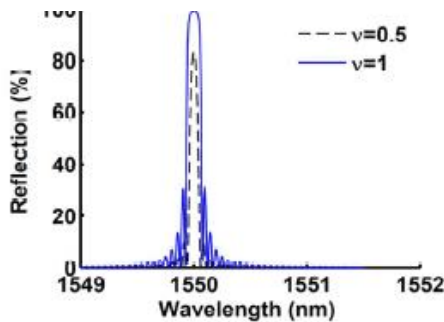
(ج)

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل ۲-۴ تغییر طول موج براگ [18] را بر حسب تغییر Λ نشان می دهد. همان طور که دیده می شود تغییرات به صورت خطی است و شیب آن ۴۴/۹۲۴۴ است.

توری براگ در واقع یک فیلتر بازتابی باند باریک است. پهنای باند فیلتر توری براگ می تواند برای کاربردهای مورد نظر افزایش یا کاهش یابد. شکل ۳-۴ طیف بازتابی دو توری یکنواخت به ازای میدان های دید نوری مختلف را نشان می دهد. شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش V علاوه بر اینکه دامنه ی توان بازتابی طول مرکزی افزایش یافته است، پهنای باند نیز وسیع تر شده است.



شکل ۳-۴: پاسخ طیف بازتابی توری براگ بر حسب طول موج برای توری های یکنواخت [18] به ازای میدان دید توری 0/5 و 1

افزایش میدان دید توری باعث زیاد شدن دامنه ی تغییرات ضریب شکست در یک دوره تناوب می شود. این موضوع باعث افزایش پراش شده و پهن شدگی طول موج مرکزی را نتیجه می دهد.

شکل ۴-۴ توان طیف بازتابی برای طول موج براگ را در مقایسه با پیشینه ی توان مد جانبی به ازای توری براگ یکنواخت و اپودایز شده

آنها پاسخ کلی توری براگ محاسبه می شود. در جدول ۴-۱ پارامترهای یک توری براگ یکنواخت ارائه شده است. [۱۸].

پارامتر	مقدار	واحد
L	۱۵	میلی متر
n_1	۱/۴۷	-
n_2	۱/۴۵۷	-
Λ	۵۳۰	نانومتر
λ_B	۱۵۵۰	نانومتر
δn_{eff}	10^{-4}	-
v	۱	-

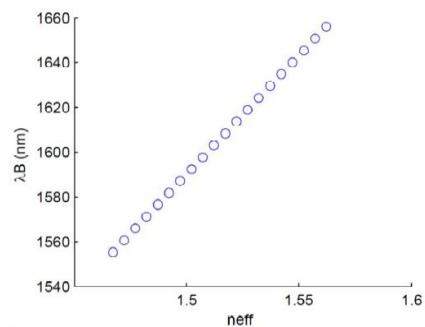
جدول ۴-۱. پارامترهای یک توری براگ یکنواخت [۱۸]

در ادامه پاسخ طیفی توری های براگ یکنواخت به ازای تغییرات پارامترهای مختلف مانند ضریب شکست مؤثر متوسط (n_{eff})، دوره تناوب نوری (Λ) میدان دید توری (v) شبیه سازی شده است. در همه ی این شبیه سازی ها، پارامترهای اولیه ی توری پارامترهای جدول ۴-۱ است و فقط پارامتر متغیر مورد نظر تغییر کرده است. طبق شرط براگ، طول موج براگ با رابطه ی (۲-۴) محاسبه می شود.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (۲-۴)$$

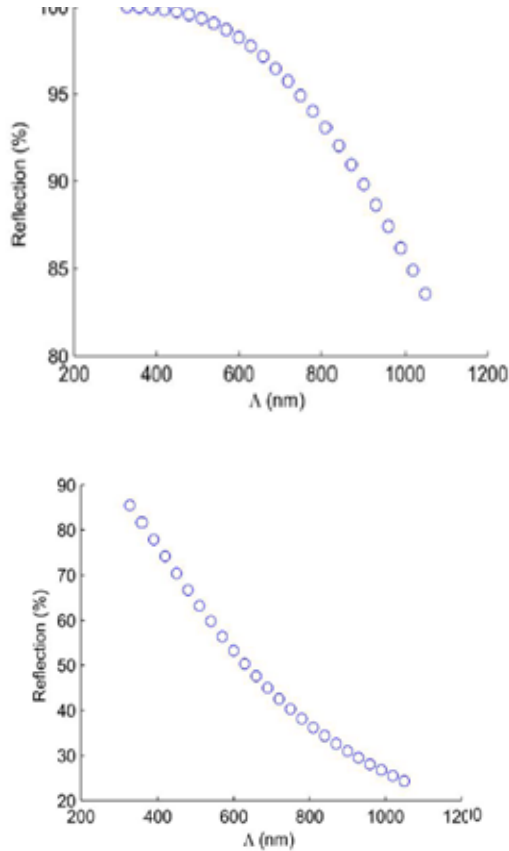
با توجه به این معادله، طول موج براگ به ضریب شکست مؤثر و دوره تناوب توری بستگی دارد.

شکل ۴-۱ تغییرات طول موج مرکزی بر حسب ضریب شکست مؤثر را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود این تغییرات خطی است و شیب آن ۱۰۶۰ نانومتر است.



شکل ۴-۱- تغییرات طول موج براگ بر حسب تغییر n_{eff} [25]

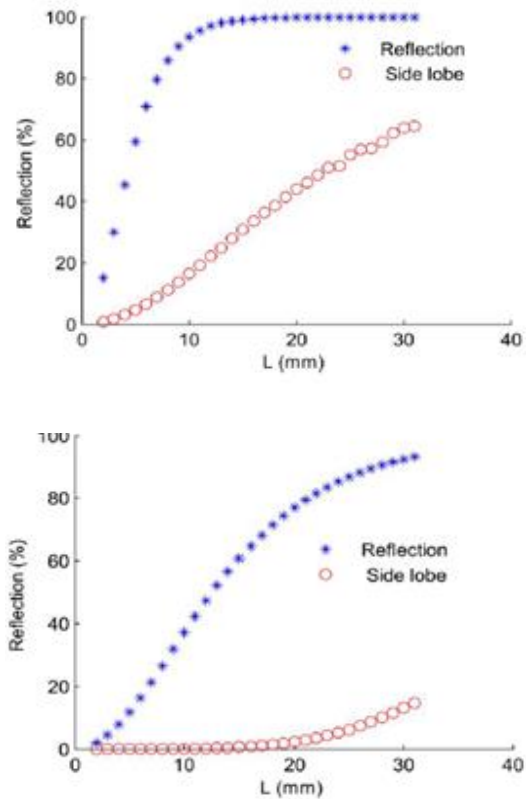
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل ۴-۵: توان طیف بازتابی طول موج براگ به ازای دوره تناوبهای مختلف ضریب شکست توری براگ (الف) یکنواخت، (ب) اپودایز شده گوسی [18].

شبه سازی نشان داد که با استفاده از توری اپودایز شده می توان نسبت توان طول موج براگ به توان مد جانبی بیشتری به دست آورد. اپودایز کردن توری باعث کاهش توان بازتابی توری می شود. با بکارگیری توری اپودایز شده، برای افزایش توان طیف بازتابی می توان طول توری بزرگتری نسبت به توری یکنواخت انتخاب کرد. البته باید به این نکته مهم اشاره کرد که ساخت توری یکنواخت ساده تر از نوع اپودایز شده است بنابراین باید بسته به کاربرد مورد نظر بین سادگی ساخت (قیمت توری براگ) و توان بازتابی مصالحه کرد.

نشان می دهد. افزایش طول توری باعث افزایش توان بازتابش براگ می شود که در هر دو توری یکنواخت و اپودایز شده ی گوسی نشان داده شده است. این موضوع را به بازتابش بیشتر نور بر اثر افزایش تعداد تفاوت ضریب شکست ها می توان نسبت داد. شبیه سازی نشان می دهد که به ازای هر دو نوع توری این افزایش رخ می دهد.



شکل ۴-۶: توان طیف بازتابی به ازای طول موج براگ و مد جانبی توری براگ به ازای طول های مختلف توری [18] (الف) یکنواخت، (ب) اپودایز شده گوسی.

شکل ۴-۵: توان طیف بازتابی برای طول موج براگ را به ازای تغییر دوره تناوب ضریب شکست توری یکنواخت و اپودایز شده گوسی مقایسه می کند. افزایش دوره تناوب ضریب شکست به معنای افزایش فاصله ی بازتابگرها و افزایش مسافت طی شده توسط نور است. تلفات فیبر مسأله قابل تأملی است که افزایش دوره تناوب آشفستگی را محدود می کند. البته باید توجه داشت که در این حالت طول موج براگ نیز تغییر خواهد کرد.

۵- نتیجه گیری

شبیه سازی نشان داد که دامنه ی بازتاب طول موج براگ در توری یکنواخت حدود ۴۰ درصد بیشتر از توری اپودایز شده است. به ازای توری های یکنواخت دامنه ی لبه ی جانبی حدود ۳۰ درصد طول موج براگ است که سهم عمده ای از توان بازتابی است در حالیکه در توری اپودایز شده می توان این لبه ها را حذف کرد.

مراجع

- [14] Y. Luo, B. Yan, Mo Li, X. Zhang, Q. Zhang, G. D. Peng, "Stress and Strain Sensing with Multimode POF Bragg Gratings", Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Cambridge, USA, 2010, pp. 696-699.
- [15] Gang D. P. , P. L. Chu, "Polymer Optical Fibre Sensing", SPIE Proceedings, Photonic Device and Technology II, Vol. 4929, 2002, pp. 303-311.
- [16] T. Erdogan, "Fiber grating spectra", J. Lightwave Technology, vol. 15, No. 8, 1997, pp.1277-1294.
- [17] Petermann, Ingemar, Fibre Bragg Gratings Realization, Characterization and Simulation, Ph.D thesis, Department of Microelectronics and Applied Physics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2007.
- [18] A. Ikhlef, R. Hedara, M. Chikh-Bled, "Uniform Fiber Bragg Grating modeling and simulation used matrix transfer method", International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, No 2, 2012, pp. 368-374.

- [1] A. Othonos, "Fiber Bragg Gratings", Review of Scientific Instruments, Vol.68, No. 12, pp.4309-4341, 1997
- [2] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrik, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, E. J. Friebele, "Fiber Grating Sensor", J. Lightwave Tech. ,vol. 15, No. 8, 1997 , pp.1442-1463.
- [3] D. Kinet, A. Grillet, J. Witt, N. Dantan, T. Thiel, K. Krebber , "Specification report on optical sensors", Optical Fibre Sensors Embedded into technical Textile for Healthcare, 2006, www.ofseth.org.
- [4] K. B. Harpreet, Optical Fibre Refractive Index, Voltage and Strain Sensors: Fabrication and Applications, PhD thesis, Engineering and Science, Victoria University, Australia, 2011.
- [5] Ch. Shing, "An investigation of chirped fibre Bragg gratings Fabry-Perot interferometer for sensing applications", PhD Thesis, Optical Sensors Group Centre for Photonics and Optical Engineering School of Engineering, Cranfield University, 2005.
- [6] X. Cheng, W. Qiu, W. Wu, Y. Luo, X. Tian, Q. Zhang, B. Zhu, "High-sensitivity temperature sensor based on Bragg grating in BDK-doped photosensitive polymer optical fiber", Chinese optics letters, Vol. 9, No. 2, 2011, pp 020602.
- [7] M. Silva-López, A. Fender, W. N. MacPherson, J. S. Barton, J. D. C. Jones, "Strain and Temperature Sensitivity of a Singlemode Polymer ptical Fibre", Optics Letters, Vol. 30, No. 23, 2005, pp. 3129-3131.
- [8] Harbach G. Nico, Fiber Bragg Gratings in Polymer Optical Fibers, PhD thesis, Institute of Applied Optics, EPFL, Switzerland, 2008.
- [9] R. Aashia, S. Asokan, "Fiber Bragg Grating sensors: New Ideas on Strain and Temperature Discrimination", International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Vol. 3, 2010, pp. 108-117.
- [10] B. O. Guan, H. W. Tam, X. M. Tao, X. Y. Dong, "Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating", IEEE Photon. Technol. Vol. 12, No. 6, 2000, pp. 675-677.
- [11] Triollet S, Robert L, Marin E, Ouerdane Y, "Discriminated measures of strain and temperature in metallic specimen with embedded superimposed long and short fibre Bragg gratings Meas". Sci. Technol. , Vol. 22, 2011.
- [12] L. T. Chen, Atomic, Molecular and Optical Physics, Nova Science Publishers, 2011.
- [13] S. K. Mondal, S. Mal, U. Tiwari, S. Sarkar, V. Mishra, G. C. Poddar, N. S. Mehla, S. C. Jain, P. Kapur, "Simultaneous measurement of strain and temperature using partially etched single fiber bragg grating sensor", International Conference on Optics and Photonics, Chandigarh, India, 2009, pp. 1-4.