

# Yenilenmiş Fiber Bragg Izgara Algılayıcı Geliştirilmesinde Deneysel Unsurlar

## Experimental Considerations in the Development of Regenerated Fiber Bragg Grating Sensors

Kıvılcım YÜKSEL ALDOĞAN<sup>1</sup>, Alvaro Gonzalez VILA<sup>2</sup>, Damien KINET<sup>2</sup> ve Christophe CAUCHETEUR<sup>2</sup>

1. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Böl.

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Gülbağçe Kampüsü, 35430, Urla (İzmir, Türkiye)  
kivilcimyuksel@iyte.edu.tr

2. Telekomünikasyon Bölümü

Mons Üniversitesi  
Boulevard Dolez 31, 7000 (Mons, Belçika)  
damien.kinet@umons.ac.be, christophe.caucheteur@umons.ac.be

**Özetçe**—Yenilenmiş (rejenere) fiber Bragg ızgaraların tasarım ve performans parametreleri ile ilgili literatür bilgileri özetlenmiştir. Ardından, yüksek sıcaklık sensörü geliştirilmesi amacıyla, birincil ızgaranın yansıma katsayısı, fiber çeşidi, sıcaklık proses reçetesi gibi temel deneysel unsurlar çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler** — fiber Bragg ızgara; fiber optik sensör; yüksek sıcaklık algılayıcıları.

**Abstract**— The literature on the Regenerated Gratings has been summarised in terms of the key design, and performance parameters. Afterwards, the practical issues such as initial reflectivity, fiber type, and the effect of annealing cycle were investigated by the way of experiments for developing high temperature sensors.

**Keywords** — regenerated fiber Bragg gratings; fiber optic sensors; high-temperature sensing.

### I. GİRİŞ

Günümüzde, fiber optik tabanlı sensörler, özellikle de fiber Bragg ızgaralar (*Fiber Bragg Grating*, *FBG*), teknik yeterliliğini ispatlamış ve onlarca sektördeki farklı endüstriyel uygulamalar için büyük oranda kabul görmüş durumdadır. Fiber optik sensörlerin hızla popülerleşmesinin en önemli nedenleri şöyle sıralanabilir:

- *Elektromanyetik girişimden etkilenmemeleri*: fiber optik sensörler çevredeki cihazların yaydığı elektromanyetik alandan etkilenmediği için elektriksel tabanlı sensörlere göre avantajlı konumdadır.
- *Hafif ve ince bir yapıya sahip olmaları*: standard bir optik fiberin çapı, koruyucu plastik kılıf dahil olmak üzere 250 µm olup küçük boyutları sayesinde malzeme ve cihazların içine kolayca uygulanmaları yönünde avantajlıdır.
- *Çok uzak mesafelerden sorgulanabilir olmaları*: Sorgulama ünitesi sensör noktalarından kilometrelerce uzağa konumlandırılabilir. Yüksek riskli uygulamalarda (örneğin nükleer enerji santrali, petrol arama kuyusu vs) sistemin uzaktan güvenli bir şekilde izlenmesi sağlanır.

- *Elektriksel olarak pasif olmaları*: yanıcı patlayıcı ortamlarda kullanılabilir.
- *Yaygın üretim kapasitesi*: Telekomünikasyon ve opto-elektronik endüstrilerindeki gelişmelerden dolayı optik sensör maliyetleri hızla azalmaktadır.
- *Çoklamalı sorgulama yeteneği*: Zamanda veya dalga-boyunda çoklamalı sorgulama teknikleri uygulanabilir.

FBG uygulamaları, yukarıda bahsedilen avantajları sayesinde ticari bir ivme kazanmakla birlikte, fiber optik sensör performansları bazı zorlu koşullarda (*harsh environment*) yetersiz kalmaktadır. Çok yüksek sıcaklıklar, yüksek basınç, kimyasal kirlilik, yüksek radyasyon seviyesi gibi fiziksel ve kimyasal özellikler, sert/zor olarak nitelendirdiğimiz ortamlarda kullanılacak sensörlerin tasarım yöntem ve parametrelerinde belirleyici rol oynar. Söz konusu zor çevre koşullarında yeni uygulama alanlarının açılmasına yönelik çalışmalar son yıllarda artarak devam etmektedir. Bu uygulamalar, uzay keşif modülleri, denizaltılar, nükleer santraller, gaz türbinleri (yüksek sıcaklığın doğru ölçümü kritik bir kontrol parametresidir), kömür ve hidrojen bazlı güç santralleri, yakıt hücreleri ve yanmalı motorlu araçlar gibi çeşitli türden ortamlarda ihtiyaç duyulan izleme/takip sistemlerini içermektedir [1]. Tüm bu uygulamalarda işlevsel olabilecek özel ızgaraların, standart (Tip-I) FBG'den çok daha üstün performans özellikleri göstermesi beklenmektedir.

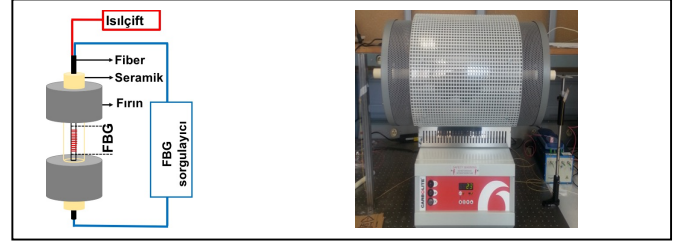
Literatürde zor çevre koşulları için önerilen fiber ızgara türleri; Tip-II, Tip In (Tip IIA), Kimyasal Bileşim Izgaraları (*Chemical Composition Gratings*, *CCG*), Femto-saniye darbeleri laser ile oluşturulmuş ızgaralar (fs-IR), ve yenilenmiş ızgaralar (*Regenerated Gratings*, *RG*) olarak listelenebilir [1].

Her tip için ızgaranın oluşum mekanizması farklılıklar göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, yüksek sıcaklık uygulamaları açısından son yıllarda en çok dikkat çeken yenilenmiş ızgaralar (RG) üzerine odaklanılmıştır.

## II. DENEYSEL ÇALIŞMA

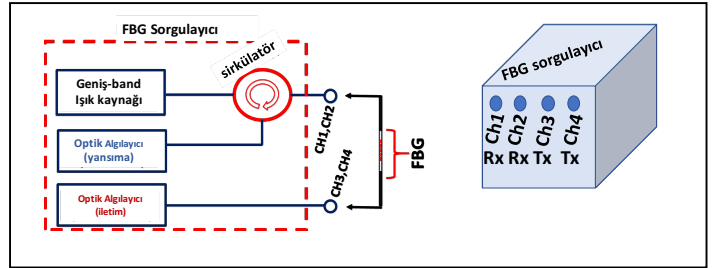
### A. Deneysel Kurulum

Deneysel çalışmalarda, Şekil 1’de gösterilen deneysel kurulum kullanılarak, birincil ızgaraya (*seed FBG*) farklı termal reçeteleri içeren prosesler uygulanmıştır. Fiber Bragg ızgaralar, sıcaklık referans bilgisini sağlayan ısılıçift ile birlikte, sıcaklık kontrollü (maksimum 1200 °C) silindirik bir fırının eksenindeki seramik klavuz içine yerleştirilmiştir (fırın fotoğrafı Şekil 1’de gösterilmiştir). Deneyler sırasında fırın, dikey ve yatay olmak üzere iki farklı pozisyonda kullanılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği ve fırın

Isıl işlem sırasında birincil ızgaranın Bragg dalga boyuna karşılık gelen yansımaya ve iletim gücü, endüstriyel uygulamalar için geliştirilmiş ticari bir sorgulayıcı ünite vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür (her 20 saniyede 1 ölçüm). Sorgulayıcı ünite 1500 nm – 1600 nm aralığını 0.005 nm’lik adımlarla tarayarak yansımaya (kanal 1 ve 2) ve iletim (kanal 3 ve 4) spektrumlarını ölçer (bakınız Şekil 2). Termal proses sonlandıktan sonra (post kurlenme) ızgaralar oda sıcaklığına dönüncüye kadar soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 2. FBG sorgulayıcı ünite

Sorgulayıcı üniteden bilgisayara aktarılan spektrum değerleri (yansımaya ve iletim spektrumları), ısılıçift tarafından sağlanan sıcaklık bilgisi ile birlikte Matlab ortamında işlenmiştir. Uygulanan sinyal analiz yöntemi 3 adımda özetlenebilir:

1: Her bir ölçüm noktası için yansımaya spektrumundaki tepe değeri (iletim spektrumundaki çukur değeri) kullanılarak Bragg dalgaboyu tespit edilir.

2: Bragg dalgaboyundaki yansımaya (ve iletim) katsayıları hesaplanır.

3: Bragg dalga boyuna karşılık gelen yansımaya gücünün zamanla değişimi sıcaklık bilgisi ile aynı grafik üzerinde aktararak rejenerasyon sıcaklığı tespit edilir.

Fiber Bragg ızgaralar, fiber optik çekirdek kırılma indisinin lazer ışınması kullanılarak kalıcı bir şekilde ve periyodik olarak değiştirilmesiyle üretilir [2]. Yenilenmiş ızgaralar ise esas olarak başlangıç ızgarasının (birincil ızgara, *seed*) özel ısıl işlemler uygulanarak yeniden yapılandırılmasıyla elde edilmektedir [1]. Söz konusu ısıl işlemin belli bir aşamasında (yaklaşık 700 °C) meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler sonucu başlangıç ızgarası tamamen silinir ve bunun akabinde UV ışınlarına maruz kalan bölgelerde yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir şekilde yeni bir ızgara etkinleşir.

Bu işlem için, birçok farklı yaklaşım raporlanmış olmakla birlikte rejenerasyon reçeteleri genel hatlarıyla *izotermik* ve *izokron* olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılabilir. İzotermik kürlemede birincil ızgara üzerine uygulanan sıcaklık sabit adımlar ile artırılır (ardışık iki sıcaklık kademesi arasında belirli bir süre beklenir). İzokron yöntemde ise birincil ızgara yüksek miktardaki sıcaklık artışına tek hamlede ve kısa bir süre içinde maruz bırakılır.

Yenilenmiş ızgaraların geliştirilmesine ilişkin en kritik iki performans parametresi, rejenerasyon etkinliği (veya proses verimliliği) ve uzun vadeli termal kararlılıktır (stabilite). Bu parametrelerden ilki, yenilenmiş (rejener) ızgara ile birincil ızgaranın yansımaya katsayıları arasındaki oranı belirtirken; ikincisi yenilenmiş ızgaranın kalibrasyon özelliklerini uzun süre muhafaza etme kabiliyetini gösterir.

Rejenerasyon etkinliği üzerinde, birincil ızgaranın hazırlanma prosedürü ve parametreleri önemli bir rol oynar. Bu parametreler; ızgara yazımında kullanılan lazer kaynağın optik gücü ve dalga boyu, ızgara kuvveti, fiberin malzeme özellikleri, fibere uygulanan gaz yükleme metodu ve ön kurlenme işlemlerini içerir. Literatürde kullanılan birincil ızgaraların spesifikasyonları Tablo I’de özetlenmiştir.

Bu çalışmada, sıcaklık sensörü uygulamalarında kullanılabilecek, yenilenmiş fiber ızgaralar elde edilmiş ve yüksek sıcaklıklarda test edilmiştir. Yenilenmiş ızgara geliştirilmesindeki temel unsurlar (birincil ızgara yansımaya katsayısı, fiber çeşidi, sıcaklık proses reçetesi) deneysel olarak analiz edilmiştir.

TABLO I. LİTERATÜRDE KULLANILAN BİRİNCİL İZGARA ÖZELLİKLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

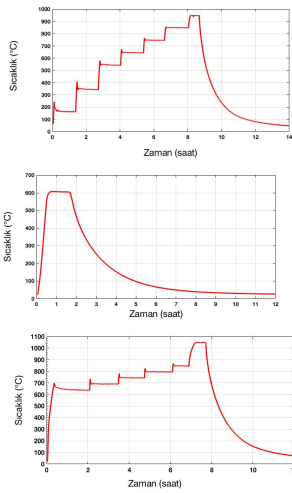
Referans	Bragg dalgaboyu (nm)	Uzunluk	Yansımaya (R) ve İletim (T <sub>L</sub> ) (dB)	Fiber çeşidi
[3]	1550.33	8 mm	R=12-16.5	Ge-katkılı silika
[4]	~1544	5 mm	T <sub>L</sub> =25	B/Ge katkılı silika
[5]	1543.5	-	R>120	Yüksek Ge katkılı silika
[6]	~1543.25	1-2 cm	R~30	Corning SMF-28
[7]	-	5-6 mm	-	SMF-H HiGe-H Ge/B-H Ge/B
[8]	1551	10 mm	T <sub>L</sub> =33	IXFiber

## B. Deney sonuçları

Deneyel çalışmalar kapsamında 30 FBG üzerinde 17 adet termal proses döngüsü test edilmiş ve 12 adet rejenere ızgara başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

Hidrojen yüklemesiz ve hidrojen yüklemeli Fibercore ve Draka (BendBright) fiber çeşitleri kullanılmıştır. Hidrojen yüklemesiz durumlarda, rejenere ızgaranın termal kararlılık göstermediği gözlemlenmiştir. Konvansiyonel Draka fiber kullanıldığında rejenerasyon sıcaklığı 1100 °C kadar artmış olup rejenerasyondan sonra elde edilen yansıma katsayısı %5 civarında düşük değerlerde kalmıştır. Hidrojen yüklenmiş Fibercore fiberler için ise rejenerasyon sıcaklığına kadar termal kararlılık sağlanmış olup, rejenerasyondan sonra %30 yansıma değerlerine ulaşılmıştır. Birincil ızgaralar argon lazer kullanılarak faz maskesi yöntemiyle yazılmıştır (Bragg dalga boyu 1550-1555 nm aralığında, ızgara boyu 5 mm).

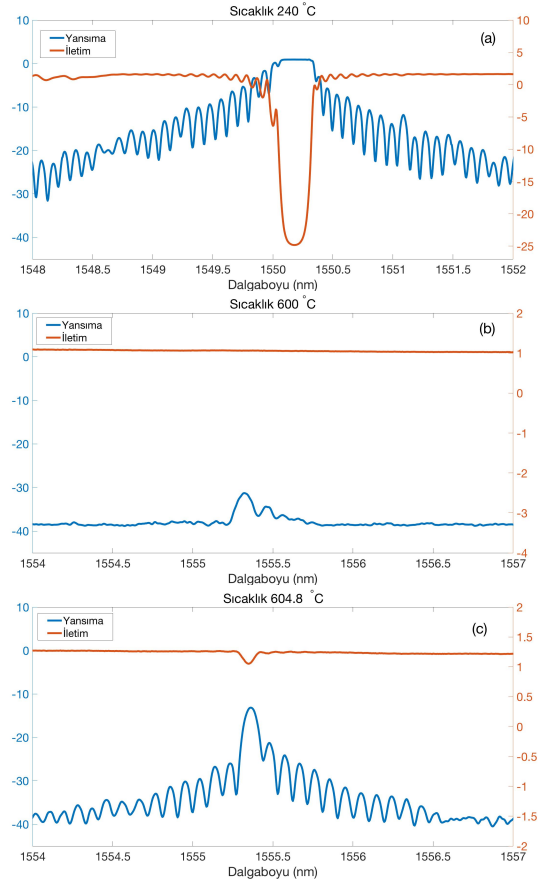
Deneyel çalışmalarda uygulanan üç farklı sıcaklık reçetesi Şekil 3’te özetlenmiştir (yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla izotermik, izokronal ve iki yöntemin birlikte uygulandığı üçüncü bir yaklaşım görülmektedir.)



Şekil 3. Deneylerde uygulanan termal proses reçeteleri

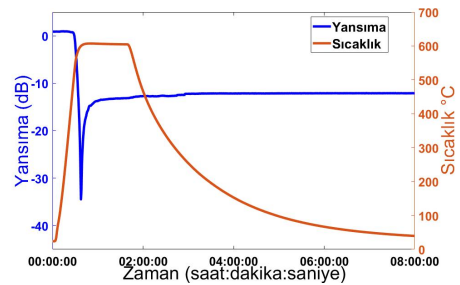
Başarılı rejenerasyon sürecine bir örnek Şekil 4’te gösterilmiştir. Bu örnekte, hidrojen yüklenmiş fibere (Fibercore) yazılmış birincil ızgaraya izokronal proses uygulanmıştır.

Şekil 4’te, söz konusu prosese ait sırasıyla, yenilenmeden önce (240 °C), birincil ızgara tamamen silindiği anda (600 °C), ve yenilenme tamamlandıktan sonra (604.8 °C) olmak üzere üç farklı sıcaklık değeri için ölçülen yansıma ve iletim spektrumları temsil edilmektedir. Tüm grafiklerde mavi çizgi ızgaradan yansıyan, kırmızı çizgi ise iletilen gücü dalga boyunun fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekilde ayrıca yenilenmeden sonra yansıma katsayısının azaldığı gözlemlenmektedir ( $R_{\text{önce}} = \%99$ ,  $R_{\text{sonra}} = \%30$ ). Bragg dalga boyunun 240 °C’deki değeri 1550.18 nm olarak ölçülmüş ve bu değer sıcaklığa bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir (Bakınız Şekil 4-c).



Şekil 4. (a) 240°C, (b) 600°C, ve (c) 604.8°C sıcaklık değerlerinde yansıma ve iletim spektrumları

Termal proses boyunca, FBG sorgulayıcı ünite tarafından her 20 saniyede bir ölçülen yansıma ve iletim spektrumları veri dosyaları halinde bilgisayara aktarılmıştır. Bu veri dosyalarını analiz ederek her bir spektrum için Bragg dalgaboyunu tespit eden ve Bragg dalgaboyunun zamanla değişimini sıcaklık bilgisi ile birlikte tek bir grafiğe aktaran Matlab kodu yazılmıştır. Şekil 4’te açıklanan deneysel örnek için bu tür bir grafik Şekil 5’te görülmektedir.



Şekil 5. Termal proses sırasında ızgaradan yansıyan oransal gücün uygulanan sıcaklık ile değişimi.

Isıl işlem tamamlandıktan sonra rejenere fiber ızgaralar soğuma sürecine bırakılmış ve oda sıcaklığına kadar kürlendikten sonra yüksek sıcaklık testine tabi tutulmuştur. Elde edilen tüm yenilenmiş ızgaraların sıcaklık testlerinde rejenerasyon sıcaklığına kadar özelliklerini korudukları tespit edilmiştir.

### III. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerin (30 FBG üzerinde toplam 17 deneme) sonuçları analiz edilmiş ve elde edilen çıkarımlar üç ana başlık altında aşağıdaki paragraflarda tartışılmıştır.

#### 1) Birincil ızgaranın yansıma katsayısı:

Test edilen FBG grubu için, birincil ızgaranın yansıma katsayısı arttıkça yenilenme sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, FBG'nin fibere yazılması esnasında, fiber yapısında oluşan hasarın yüksek yansıma katsayılı ızgaralar için daha fazla olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Bu önerinin ileriki deneylerde (ızgara yapısındaki olası yapısal hasarların yüksek çözünürlüklü görüntüleme teknikleri ile incelenmesi yöntemiyle) doğrulanması planlanmıştır.

#### 2) Fibere Hidrojen yüklenmesi:

Fibere Hidrojen yüklenmesinin proses verimliliğini arttırdığı deneysel olarak gösterilmiştir. Konvansiyonel fiber ile elde edilen rejenere ızgara yansıma katsayısı %5 değerinin altında kalırken, hidrojen yüklenmesi ile bu katsayı %40 değerine kadar yükselmektedir.

Hidrojen yükleme işleminin proses verimliliğindeki işlevi şu şekilde açıklanabilir [9]:

- Hidrojen yüklemesi, Bragg yapısı içinde UV ışınlarına maruz kalan bölgeler ile diğer kısımlar arasında oluşan mekanik stres farklarını azaltmaktadır (Hidrojen yüklemesi durumunda, UV nedeniyle oluşan OH molekülleri periyodik bir relaksasyon durumu meydana getirmektedir).
- Elde edilen sensörler yüksek sıcaklıklara her ısıtıldığında, ızgara içinde farklı kristal yapılara geçiş potansiyeli Hidrojen yüklemesi sayesinde azalmaktadır.

Hidrojen yüklenmesi her ne kadar proses verimliliğini arttırsa da pahalı bir uygulamadır. Bu nedenle çalışmalarımız kapsamında konvansiyonel fiberler ile bazı denemeler yapılmıştır. Bu tür maliyet etkin yaklaşımlarla yenilenmiş ızgara elde edilmesi konusunda daha ileri araştırmalar yapılması gerekmektedir.

#### 3) Termal proses reçetesi:

Çalışmalarımız kapsamında tespit edilen bir diğer önemli deneysel unsur, termal proses reçetesinin etkin bir şekilde uygulamaya konulmasıdır. Çalışmanın başlangıcındaki denemelerde fırın dikey pozisyonda kullanılmış ve bu pozisyonun ısınan havanın fırın içindeki (yukarıya doğru) hareketi nedeniyle sensörler üzerinde homojen bir sıcaklık

dağılımı elde etmeye uygun olmadığı tespit edilmiştir. Sorun fırın yatay pozisyonda konumlandırılarak giderilmiştir.

İlk denemelerde ayrıca izotermal reçete uygulanmış fakat fırın kontrol mekanizmasından kaynaklı istenmeyen sıcaklık sıçramaları meydana gelmiştir (bakınız Şekil 3). Söz konusu sıcaklık sıçramaları özellikle rejenerasyon sıcaklığına yaklaşıldığı aşamada (700 °C) FBG'ye zarar vererek yenileme prosesinin yarıda kalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca izotermal prosesin uygulanması uzun zaman almaktadır. Bu problemlere çözüm olarak izotermal ve izokronal proseslerin ardışıl olarak uygulanması denenmiştir. Bu şekilde hem süreden tasarruf edilmiş, hem de rejenerasyon sıcaklığına yaklaşıldıkça sıcaklık adımları küçültülerek sıçramalar azaltılmaya çalışılmıştır. En son olarak izokronal proses uygulanmıştır (oda sıcaklığından 600 °C'ye dakikada 10 °C ısıtılarak). İzokronal sıcaklık reçetesinin üç yöntem arasında en başarılı sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

### BİLGİLENDİRME

*Deneyisel çalışmalarda destek veren İYTE Elektronik Müh. Böl. öğrencileri Hazal Kahraman, Onur Ateş ve Şamil Şirin'e teşekkür ederiz. Öğrenciler Erasmus Staj Hareketliliği, Kıvılcım Yüksel Aldoğan TÜBİTAK (BİDEB-2219-1059B191600612), Christophe Caucheteur F.R.S.-FNRS tarafından desteklenmiştir.*

### KAYNAKLAR

- [1] Mihailov S.J., "Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments" (review), *Sensors*, Vol. 12, 2012, p 1898-1918.
- [2] Othonos and Kalli, "Fiber Bragg Grating Sensors in Fibre Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", Artech House, Inc., 1999.
- [3] Zhang B., Kahrizi M. "High-Temperature Resistance Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Fabrication". 2007, *IEEE Sensors J. Vol. 7(4)*, 2007, p. 586-591.
- [4] Bandyopadhyay S., Canning J., Stevenson M., Cook K., "Ultra-high-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm", *Optics Letters*, vol. 33, 2008, p 1917-1919
- [5] Canning J, Bandyopadhyay S, Stevenson M, Biswas P, Fetton J, Aslund M. "Regenerated Gratings" *Regenerated Gratings Journal of the European Optical Society - Rapid Publications*, vol. 4(09052), 2009, p 1990-2573
- [6] Barrera D., Finazzi V., Villatoro J., Sales S., Pruneri V., "Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Applications", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, 2012, p 107-112
- [7] Bueno A., Kinet D., Megret P. and Caucheteur C. "Fast thermal regeneration of fiber Bragg gratings". *Opt. Letters*, vol. 38(20), 2013.
- [8] Celikin M., Barba D., Bastola B., Ruediger A., and Rosei F. "Development of regenerated fiber Bragg grating sensors with long-term stability", *Opt. Express* vol. 24(19), 2016, p 21897-909
- [9] Smelser C. W., Mihailov S. J. and Grobnc D., "Hydrogen loading for fiber grating writing with a femtosecond laser and a phase mask", *Opt.Letters* 29(18) 2004, p 2127