

ELEKTRİK ARK TEKNİĞİ İLE UZUN PERİYOTLU FIBER IZGARA TASARIMI VE ÜRETİMİ

Fırat Ertaç DURAK^a, İsa NAVRUZ^b, Ahmet ALTUNCU^a

^aDumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, KÜTAHYA

^bAnkara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

fiirat@dpu.edu.tr, inavruz@ankara.edu.tr, altuncu@dpu.edu.tr

(Geliş/Received: 19.08.2011; Kabul/Accepted: 09.10.2012)

ÖZET

Elektrik ark yöntemi, fiberin mekanik ortamda kaydırılırken elektriksel ark deşarjları ile yazıldığı, esnek, uygulaması kolay ve ekonomik bir tekniktir. Bu çalışmada, elektrik ark yöntemi ile uzun periyotlu fiber ızgarasının (LPFG) üretilmesi için deneysel bir düzenek önerilmiş ve üretime etki edebilecek tasarım değişkenleri araştırılmıştır. Tipik bir LPFG' nin üretildiği ilk deneysel çalışmanın ardından, LPFG kullanarak erbiyum katkılı fiber yükselticinin (EDFA) kazanç spektrumunun düzleştirilmesi üzerine araştırmaya yön verilmiştir. Araştırma sonuçları ve deneysel bulgular, elektrik ark tekniği ile üretilen LPFG'lerin EDFA'nın kazanç spektrumunu düzleştirici yönde olumlu etki sağlayabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Uzun periyotlu fiber ızgarası, elektrik ark tekniği, EDFA kazancı.

DESIGN AND PRODUCTION OF LONG PERIOD FIBER GRATING USING ELECTRICAL ARC TECHNIQUE

ABSTRACT

The electrical arc technique is a flexible, easily applicable and cost-effective technique, in which fiber is written to form a grating structure using electrical arc-discharges during mechanical motion. In this study, an experimental set up is proposed to product long period fiber gratings (LPFG) and the design parameters that affect the process are investigated. After the first experimental study on production of a typical LPFG, the research is directed on smoothing the gain spectrum of erbium doped fiber amplifiers using LPFG. The research results and experimental findings demonstrate that LPFGs manufactured using electrical arc technique can provide positive a effect on smoothing the gain spectrum of an EDFA.

Keywords: Long period fiber grating, electrical arc technique, EDFA gain.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Optik fiber ızgaraları, fiber özünün kırılma indisinde küçük değişimler oluşturulmuş özel bir tür fiberdir ve genellikle 1-5cm uzunluğundadır. İndisteki bu değişimlerin örüntüsü periyodik bir ızgara desenini andırdığı için optik fiber ızgarası olarak isimlendirilirler. Iızgara periyodu, kullanılan ışığın dalgaboyuna yakın ise yansıma modunda çalışan fiber Bragg ızgarası (FBG), ışığın dalga boyundan çok büyük ise uzun periyotlu fiber ızgarası (LPFG) elde edilir. LPFG ler genellikle 100µm ve üzerinde bir ızgara periyoduna sahiptirler. LPFG'lerin çalışması, fiberin temel öz (çekirdek) modu ile ileri yönde

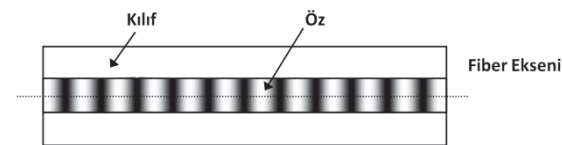
yayılan kılıf modları arasında bağlaşım oluşumu esasına dayanır. Bu bağlaşım, fiber ızgarasının çıkışında ışığın optik karakteristiklerinde değişime neden olur. LPFG' ler özellikle, band durdurucu filtre, optik yükselteçlerin kazanç spektrumunun düzleştirilmesi, lazer filtreleri, optik dönüştürücüler, WDM kanal ayrıştırıcılar ve optik sensörler gibi farklı uygulama alanlarına sahiptirler[1-5]. LPFG'lerin ilginç özellikleri sayesinde, keşfedilmeyi bekleyen pek çok uygulama potansiyeline de sahip olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle araştırmacıların LPFG'lere olan ilgisi son on yıldır artarak devam etmektedir.

LPFG'lerin üretimi konusunda literatürde birden fazla teknikten söz edilmektedir. LPFG'lerin üretimleri üzerine yapılan ilk çalışmada, bir genlik maskesi ve UV lazer ile Ge katkılı foto-duyarlı fiberin yazılabileceği gösterilmiştir[6]. Bu metot oldukça yaygın olmasına rağmen ilerleyen yıllarda, CO₂ lazer ışınma[7,8], elektrik ark deşarj [9-13], femto-saniye lazer ışınma [14], mekanik mikro-bükülme [15], oymalı kırıştırma [16], ve iyon ışın aşılama [17] tekniklerini kullanan LPFG üretim metotları da önerilmiştir. Bu metotlar arasında elektrik ark deşarj tekniği herhangi bir laser kaynaktan ışınma, optik ayna, huzme bölücü ve maske gibi optiksel bileşenler kullanmadığı için ekonomik olmasının yanı sıra, esnek ve uygulaması oldukça kolay bir teknik olarak göze çarpmaktadır.

Elektrik ark yöntemi, fiber çekirdeğinin belirli aralıklarla elektrik ark-deşarjlarına maruz bırakılması sonucu mekanik deformasyona uğraması prensibine dayanır. Bu işlem, fiber özünde UV işlem sonrası oluşan ızgara desenli formasyona benzer bir sonuç üretir. Bu çalışmada ilk olarak LPFG'lerin optiksel davranışını sergileyen özet bir teorik altyapı sunulduktan sonra, elektrik ark yöntemini kullanarak geliştirdiğimiz LPFG üretim düzeneği ve bu düzenele gerçekleştirilen ilk denemeler gösterilmiştir. Gerçekleştirilen LPFG'lerin filtre karakteristikleri, C bandında çalışan bir EDFA'da üretilen geri yönlü yükseltilmiş spontane yayılım (backward ASE) işareti kullanılarak üretim prosesi esnasında gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. Bu çalışma, üretilen LPFG'lerin, örnek bir uygulama olarak, erbiyum katkılı fiber yükselteçlerin (EDFA) kazanç spektrumunun düzleştirilmesi için kullanılabileceğini göstermiştir. Son olarak deneysel çalışmaların tutarlılığı tartışılmıştır.

2. TEORİ (THEORY)

LPFG'ler genellikle fiber özünün kırılma indisinde periyodik değişimler içerecek biçimde üretilirler. Bu değişimlerin fiber boyunca aksel örüntüsü Şekil 1' de görüldüğü gibi bir ızgara görünümüne benzer.



Şekil 1. Fiber özünde ızgara desenini andıran periyodik değişimler (A periodical pattern in the fiber core similar to a grating).

LPFG boyunca ilerleyen ışık spektral değişime uğrar. Bu değişim, Eş. 1' de verilen faz uyum şartını sağlayan dalgaboylarında oluşan, öz modundan kılıf moduna bir kublajdan kaynaklanır [18].

$$\lambda^m = (n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m})\Lambda \quad (1)$$

Burada λ^m , m . kılıf moduna karşılık gelen rezonans dalgaboyu, Λ ızgara periyodu, n_{eff}^{co} ve $n_{eff}^{cl,m}$ sırasıyla özün ve kılıfın etkin kırılma indisleridir. Ekseni z doğrultusunda olan sinüs biçimli indis değişimine sahip bir fiber ızgarasında öz ve kılıf modları arasındaki kublaj basitçe,

$$\frac{dA}{dz} = \kappa_i B(z) e^{j2\delta z} e^{-j\varphi_i}, \quad (2)$$

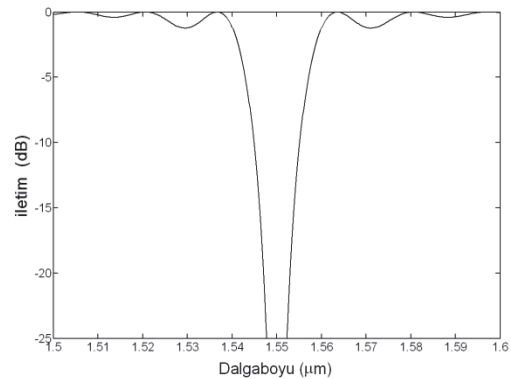
$$\frac{dB}{dz} = -\kappa_i A(z) e^{-j2\delta z} e^{j\varphi_i}$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Burada, $\delta = \frac{\pi}{\Lambda} (\frac{\lambda_m}{\lambda} - 1)$ dalga boyundan sapmanın ölçüsü olan faz uyumsuzluğu, κ_i ve φ_i sırasıyla i . adımda kublaj katsayısı ve ızgara fazı, $A(z)$ ve $B(z)$ sırasıyla ilgili modlara karşılık gelen $E_A(z) = A(z)e^{-j\beta_0 z}$ ve $E_B(z) = B(z)e^{-j\beta_m z}$ elektrik alanlarının genlikleri, β_0 ve β_m ise yayılma sabitleridir. Eş. 2' de verilen denklem çiftinin, Transfer Matrisi metodu kullanılarak sayısal çözümü elde edilebilir. Bu yöntemde, fiber ızgarası eş adımlara bölünerek her adımda yayılan elektrik alanlar hesaplanabilir[18, 19].

Kırılma indisinin periyodik değiştiği tekdüze ızgara yapıları için sayısal çözüm gerektirmeyen analitik çözümlerde sunulabilir. L uzunluklu tekdüze bir LPFG'nin iletim spektrumu,

$$|E_A(L)|^2 = \cos^2 \left[L(\delta^2 + \kappa^2)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{\delta^2}{\delta^2 + \kappa^2} \sin^2 \left[L(\delta^2 + \kappa^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

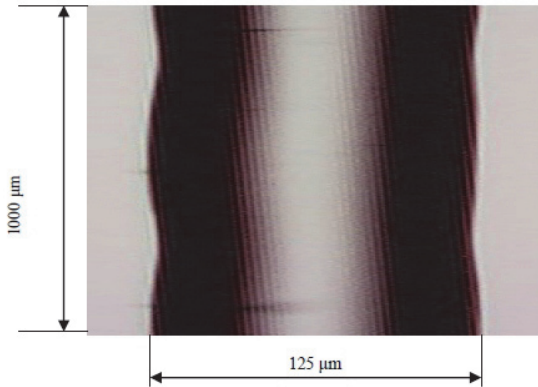
kolayca hesaplanabilir. Böyle bir fiber ızgarası, $\kappa = \frac{\pi}{2L} n$, $n=1,3,5,\dots$ eşitliğini sağlayan kublaj katsayıları için, rezonans dalgaboylarında maksimum dip oluşturan bir iletim spektrumu ile karakterize edilebilir. Şekil 2' de tipik, ızgara boyu (L) 2cm, ızgara sayısı 100, ızgara periyodu 200µm olan tekdüze bir LPFG' in iletim spektrumu görülmektedir.



Şekil 2. İdeal, tipik bir tek modlu LPFG spektrumu (An ideal, typical single mode LPFG spectrum)

Tek modlu fiberde UV tekniği ile üretilen LPFG'nin öz kırılma indisi, fiber kesitinde simetrik bir bozunum gösterir. Oysa ki, elektrik ark tekniği ile üretilen LPFG'ler fiber öz ve/veya kılıfında asimetrik olan geometrik bozulmalar içerir. Bu yüzden UV tekniğini kullanan tek modlu LPFG üzerinde LP₀₁ veya HE₁₁ öz modu baskın iken elektrik ark tekniği kullanıldığı zaman bu modun yerini asimetrik kılıf modları alır.

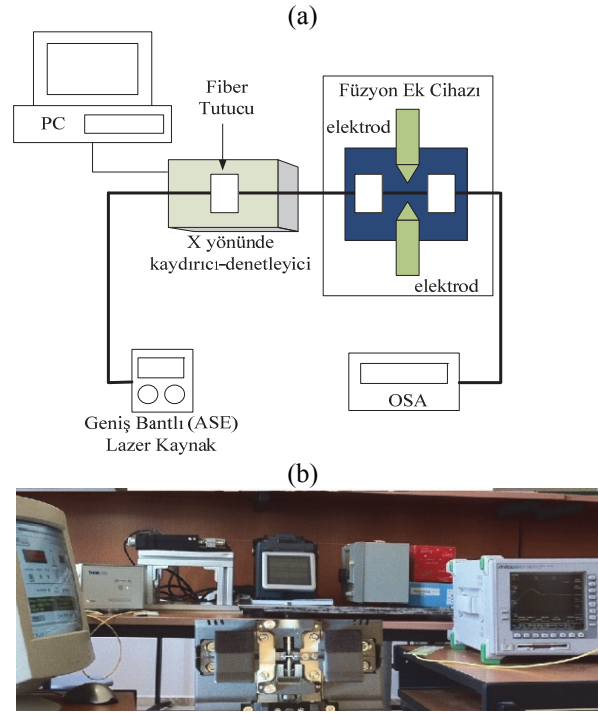
Şekil 3' de elektrik ark deşarjları sonrası fiberde oluşan geometrik bozulmalar görülmektedir. Bu bozulmalar, fiber öz ve kılıfın yarıçapında oluşan değişimler, fiber kılıfında oluşan mikro-bükülmeler ve fiber özünde meydana gelen ekstenel kaymalar olarak sınıflandırılabilir. Bu tür asimetrik bozulmaların karmaşık olmasından dolayı elektrik ark tekniği ile üretilen LPFG'lerin oluşum mekanizması literatürde tam olarak açıklanabilmiş değildir. Ancak yakın bir zamanda yapılan bir araştırmada, uygulanan elektriksel ark deşarjındaki sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan periyodik mikro-bozulmaların, saf silika fiberin kırılma indisi modülasyonuna uyarlanmasının doğru bir yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır[20].



Şekil 3. Ark işlemi sonrası LPFG'nin dış yüzeyinde oluşan mikro-bükülmeler (The microbends on the LPFG surface occurred after the arc processes)

3. ELEKTRİK ARK-KAYNAK TEKNİĞİ İLE LPFG'LERİN ÜRETİLMESİ (MANUFACTURING OF LPFG'S USING ELECTRICAL-ARC TECHNIQUE)

Optik fiber endüstrisinde kullanılan elektrik ark-kaynak cihazları orijinalinde, iki fiberi bir konnektör kullanmadan doğrudan birbirine eklemek için üretilmişlerdir. Bu cihazlar, yeterli sıcaklığa ulaşan iki fiber ucunun ergimesi sonucu birbirine kaynaşması için ısı bir işlem yürütürler. Bu işlem biraz ayrıntılı olmasına rağmen sıcaklığı kontrol eden iki etken değişkenlerden biri ark akımı, diğeri ark süresidir. Bu değişkenlerin kontrolü ve fiberin elektrik ark cihazında yeterince gerilmesi sayesinde elektrik ark kaynağı kullanılarak LPFG üretilebilir. Şekil 4'te, bu amaç için geliştirilen deney düzeneğinin şematik diyagramı ve resmi görülmektedir.

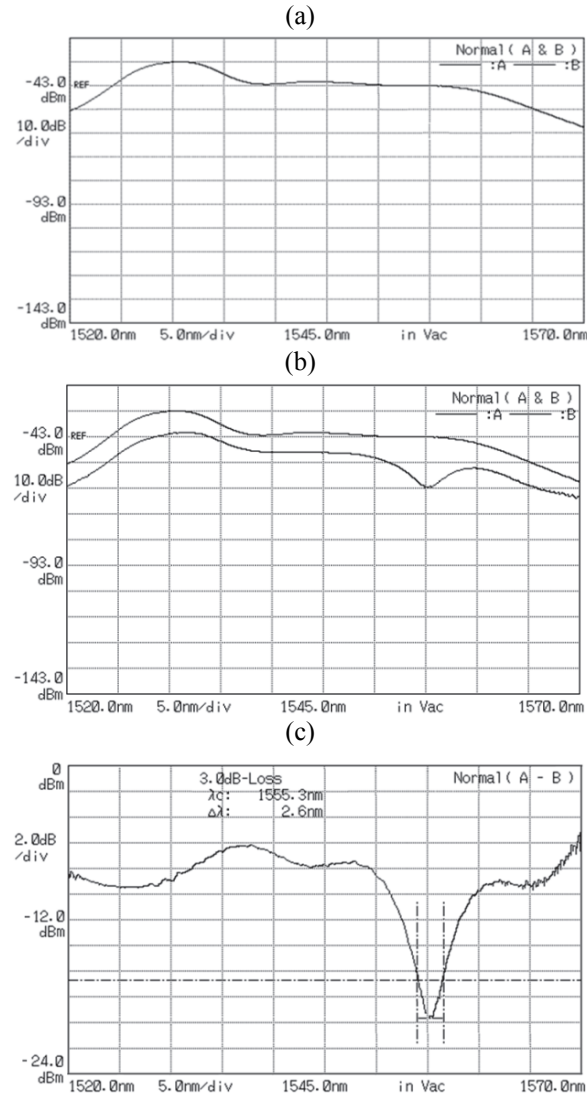


Şekil 4. LPFG üretmek için geliştirilen sistemin (a) şematik diyagramı ve (b) fotoğrafı (The developed LPFG manufacturing system (a) schematic diagram (b) photograph)

Bu düzenekte, LPFG yazılacak fiberde periyodik olarak belirli sayıda elektrik ark deşarjı uygulanmakta ve ardından fiber eksen boyunca izgara periyodu kadar ötelenmektedir. Bu prosesinde, uygulanan ark akımı ve ark süresi ark kaynak cihazı üzerinden, fiber gerginliği ise fiberin bir ucuna asılan harici ağırlık ile kolayca kontrol edilebilmektedir. Fiberin eksen boyunca ötelenmesi için bilgisayar kontrollü ve 0.1 µm hassasiyetinde tek eksenli bir elektromekanik kaydırıcı sistem kullanılmıştır.

Bu çalışmada, düzenek üzerinde yapılan tüm LPFG işleme denemelerinde HES kablo G652 (S-SMF) tek modlu fiberleri kullanılmıştır. Fiberin gerginliği izgara oluşumuna etki eden önemli bir faktördür. Yeterli miktarda gerginlik sağlamak için LPFG yazılan fiberin bir ucunda 5 gr'lık bir ağırlık kullanılmıştır. Ark uygulama süresince, cihazın ark akımı 10 mA ve ark süresi 1000 ms olarak sabit tutulmuştur. LPFG yapısı oluşacak fiberin girişine, C bandında (1520-1570 nm) çalışan bir EDFA'dan elde edilen geri yönlü ASE işareti uygulanmıştır. ASE kaynağında kullanılan 6m uzunluğundaki EDF, 980 nm'de pompalanmakta ve elde edilen geniş bantlı geri yönlü ASE gürültüsü LPFG'nin üretim aşamasında gerçek zamanlı olarak test edilmesini sağlamak üzere genişbantlı sinyal kaynağı olarak kullanılmaktadır. LPFG yapısı oluşan fiberin diğer ucundan alınan ASE işareti, Anritsu MS9710B optik spektrum analizöre (OSA) uygulanmıştır. Ark işlemi boyunca OSA ekranında 1520-1570 nm dalgaboyu penceresi gerçek zamanlı olarak gözlemlenmiştir.

Ark işlemine başlamadan önce elde edilen fiber çıkışındaki ASE spektrumu, Şekil 5(a)'da görüldüğü gibi elde edilmiş ve OSA belleği üzerine saklanmıştır. Sistemde, ASE spektrumunu etkileyebilecek pasif fiber kaybindan başka bir mekanizma bulunmadığından, gözlemlenen ASE spektrumunun tipik bir EDFA'nın kazanç spektrumu ile tamamen örtüştüğü söylenebilir. İlk deney, fiber üzerine 510µm aralıklarla 160 defa ark uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrası fiber yüzeyinde Şekil 3'e benzer mikro-bükülmeler gözlemlenmiştir. Uygulama sonrasında LPFG yazılan fiber çıkışında elde edilen işaretin dalgaboyu spektrumu ilk spektrumla karşılaştırmalı olarak Şekil 5(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Elektrik arkı uygulayarak üretilen LPFG' li sistemde (a) ızgara işlemi öncesi elde edilen çıkış ASE spektrumu, (b) ızgara işlemi sonrası elde edilen karşılaştırmalı ASE spektrumu, (c) üretilen LPFG' nin iletim spektrumu. (ASE output signal spectra (a) before grating manufacturing process, (b) comparative spectra after grating manufacturing process, (c) transmission spectrum of the manufactured LPFG)

Fiberde oluşan bu mekanik değişimlerin spektral etkisini gözlemlemek için elektriksel ark işleminin öncesi ve sonrasında elde edilen spektrumların farkını analiz etmek gerekir. Bu analiz için, elektriksel ark işlemi sonucunda elde edilen Şekil 5(b) ile, işlem öncesi spektrumu gösteren Şekil 5(a) arasındaki fark alınarak Şekil 5(c) üretilmiştir.

Şekil 5(c)'de görülen spektrumun, tipik bir LPFG' nin iletim spektrumuna benzediği açıkça söylenebilir. Spektrumun dip oluşturduğu dalgaboyuna karşılık gelen LPFG' nin rezonans dalgaboyu 1555.3nm, 3dB band genişliği ise 2.6nm olarak hesaplanmıştır. Şekil 2' de iletim spektrumu verilen ideal bir UV işlenmiş LPFG ile karşılaştırıldığında, elektriksel ark ile üretilen LPFG' nin iletim spektrumunun 6-7dB kadar kayıplı olduğu fark edilebilir. Bu durumun, fiber yüzeyinde mikro-bükülme biçiminde oluşan geometrik bozulmaların, fiber içinde kılavuzlanan modda saçılma kayıplarına yol açacağı düşünüldüğünde normal karşılanması gerekir.

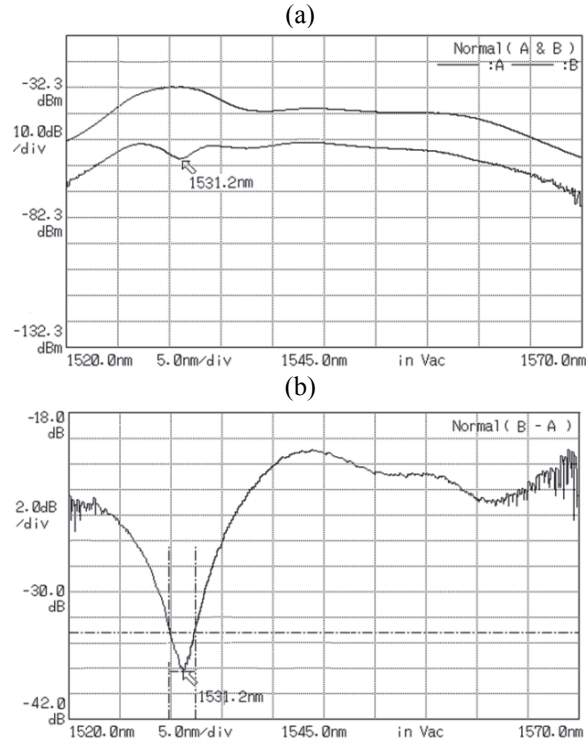
Fibere uygulanan ark aralıklarını, ya da başka bir ifadeyle ızgara periyodunu değiştirerek iletim spektrumunda elde edilen rezonans dalgaboyunun yeri değiştirilebilir. Bu sayede, spektrumda istenilen bir dalgaboyu bandında çalışan bir band durdurucu filtre (BSF) uygulaması gerçekleştirilebilir. Hatta üretilen LPFG, bir EDFA' nın kazanç spektrumunun düzeltilmesinde kullanılabilir.

Tipik bir EDFA kazanç spektrumuna karşılık gelen çıkış ASE spektrumu Şekil 5(a)'da verilmişti. 1520-1570nm aralığı için OSA'da elde edilen spektrumdan görüleceği üzere, kazanç 1520nm' den itibaren artmaya başlamakta, 1530nm civarında tepe yaptıktan sonra 1543nm 'den 1560nm'ye kadar neredeyse sabit kalmakta ve daha sonra tekrar azalmaktadır. Hâlbuki optik yükselteçli iletim sistemlerinde, EDFA'nın çalışma dalgaboyu aralığında tamamen düz bir kazanç spektrumuna sahip olması beklenir. EDFA' nın kendi doğasından kaynaklanan 1530nm civarındaki tepe karakteristiğinin LPFG kullanarak bastırılması, EDFA'nın kazanç dalgalanmalarını azaltacaktır.

EDFA çıkış spektrumuna LPFG' nin olumlu etkisini gözlemlemek için, ızgara periyodu 500µm ve uygulanan ark sayısı 156 olan bir LPFG üretilmiştir. Şekil 6'da, LPFG işlenmeden önce ve 156. ark sonunda elde edilen ASE spektrumları ile bu spektrumların farkı olan LPFG'nin iletim spektrumu verilmiştir.

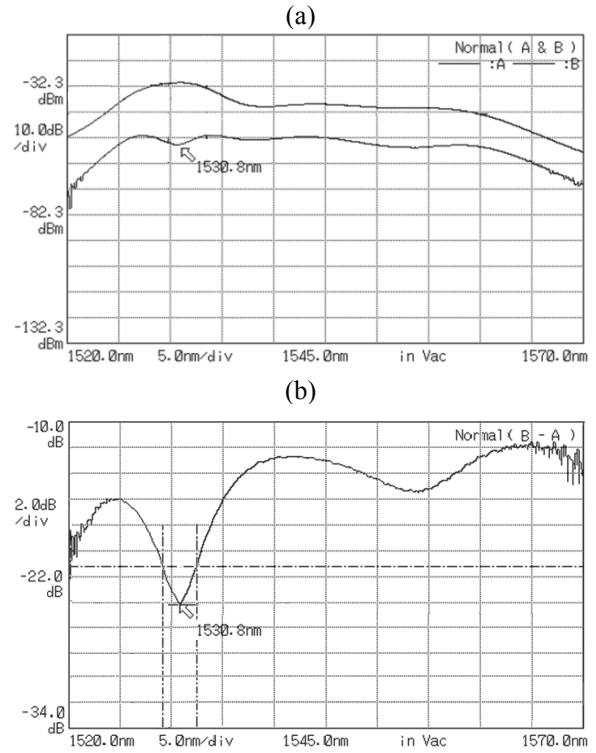
Şekil 6 (b)' de, LPFG' nin 1531.2nm dalgaboyu civarında dip oluşturduğu görülmektedir. Bu spektral çökmenin, EDFA spektrumunun tepe yaptığı 1525-1535nm dalgaboyu aralığına bir bastırma etkisi oluşturduğu Şekil 6 (a)' da açıkça görülmektedir. Ancak bu dalgaboyu aralığında tepenin yerini bir salınımın aldığını gözardı etmemek gerekir. Bu

salınım 3.83dB olarak ölçülmüştür. Spektral çökmenin merkezi 1530nm'ye doğru kaydırılabilir ve derinliği azaltılabilirse EDFA spektrumundaki tepenin daha hafif dalgalanmalar ile düzleştirilmesi mümkün olabilir.



Şekil 6. Sistem çıkış ASE sinyali ve LPFG iletim spektrumları; ızgara periyodu 500 μm , uygulanan ark sayısı 156, (a) ızgara yazma işlemi öncesi ve sonrası, (b) LPFG iletim spektrumu (The system output ASE signal and LPFG transmission spectra; the grating period is 500 μm , the number of arc is 156, (a) before and after grating writing process, (b) LPFG transmission spectrum)

Izgara periyodu 497 μm ve uygulanan ark sayısı 127 olarak gerçekleştirilen bir diğer deneysel çalışmanın sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 (b)'de görüldüğü gibi, LPFG'nin dip oluşturduğu rezonans dalga boyu, beklendiği gibi 1530.8 nm'ye kayarken, dip derinliğinde de bir azalma kaydedilmiştir. Bu gelişmenin, Şekil 7 (b)'den görüleceği üzere EDFA spektrumunun tepe bölgesini merkezleyen daha hafif dalgalanma ile düzleştirme etkisi sağladığı tespit edilmiştir. EDFA'nın 1525-1565 nm aralığındaki kazanç spektrumu yaklaşık $\pm 1.72\text{dB}$ içinde dengelenmiştir. LPFG'nin üretiminde genlik maskesi ve UV lazerin kullanıldığı bir çalışmada, A. Ping Zhang ve arkadaşları, EDFA'nın kazanç spektrumunu 1526-1556 nm aralığında $\pm 0.35\text{dB}$ içinde dengelemeyi başarmışlardır [21]. Ancak bu çalışmada, tekdüze bir ızgara yapısı yerine, ızgara adımı değişken ve iki ayrı ızgaradan oluşan tümlşik fiber ızgarası kullanılmıştır. Oldukça ekonomik, üretimi kolay bir teknik olan elektrik-ark yöntemi ile ürettiğimiz ve sadece bir tekdüze LPFG ile elde ettiğimiz sonuç, bu çalışma ile karşılaştırılabilir ölçekte dir.



Şekil 7. Sistem ASE çıkış sinyali ve LPFG iletim spektrumu; ızgara periyodu 497 μm , uygulanan ark sayısı 127, (a) ızgara yazma işlemi öncesi ve sonrası, (b) LPFG iletim spektrumu (The system output ASE signal and LPFG transmission spectra; the grating period is 497 μm , the number of arc is 127, (a) before and after grating writing process, (b) LPFG transmission spectrum)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada sunulan elektrik ark düzeneği ile pahalı optik enstrümanların kullanımı gerekmeden daha kolay bir yöntemle LPFG üretilebileceği gösterilmiştir. Düzenek üzerinde fibere uygulanan ark periyodu rezonans dalga boyunu belirlerken, ark sayısı bu dalga boyundaki spektral çökmenin derinliğini kontrol etmektedir. Sunulan deneysel düzenek, uzun periyotlu fiber ızgarasının iletim spektrumu değişiminin, üretim süresince gerçek zamanlı gözlemlenmesini sağlamıştır. Böylece LPFG'nin iletim spektrumu istenildiği gibi şekillendirilmiştir. Tasarım değişkenleri, sistemde kullanılan EDFA'nın ASE spektrumu kullanılarak test edilmiştir. Deneysel sonuçlarda, üretilen tekdüze bir LPFG ile, EDFA'nın kazanç spektrumunun 1525-1565 nm aralığında yaklaşık $\pm 1.72\text{dB}$ içinde düzleştirilebildiği gösterilmiştir.

Uygulanan ark sayısı arttıkça doğal olarak LPFG'nin iletim kayıpları da artmaktadır. Kayıpları azaltmak ve düzleştirilmiş kazanç band genişliğini artırmak için daha az sayıda ark uygulanmış LPFG'lerden oluşan bir ızgara dizisi kullanmak faydalı olabilir. Bu sayede özellikle WDM sistemler için arzu edilen daha geniş

bir spektrumda daha küçük bir dalgalanma ile EDFA'nın kazanç spektrumu iyileştirilebilir.

Bilgilendirme: Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi BAP komisyonu başkanlığının 2009-3 nolu projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yu, Y., Lui, L., Tam, H. ve Chung, W., "Fiber-Laser Based Wavelength Division Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor Systems", **IEEE Photonics Technology Letters**, Cilt 13, No 7, 702-704, 2001.
2. Chen, L.R., "Phase Shifted Long-Period Gratings by Refractive Index Shifting", **Optics Communications**, Cilt 200, No1-6, 187-191, 2001.
3. Lin, C.Y., Wang, L.A. ve Chern, G.W., "Corrugated Long-Period Fiber Gratings as Strain, Torsion, and Bending Sensors", **IEEE J. of Lightwave Technology**, Cilt 19, No 8, 1159-1168, 2001.
4. Kalachev, A.I. ve Nikogosyan, D.N., "Long Period Fiber Grating Fabrication by High Intensity Femtosecond Pulses at 211nm", **IEEE J. of Lightwave Technology**, Cilt 23, No 8, 2568-2578, 2005.
5. Navruz, I. ve Altuncu, A., "Optimization of Phase Shifted Long-Period Fiber Gratings for Multiband Rejection Filters", **IEEE J. of Lightwave Technology**, Cilt 26, No 14, 2155-2161, 2008.
6. Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D.C. ve Kawasaki, B.S., "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication", **Applied Physics Letters**, Cilt 32, No 10, 647-649, 1978.
7. Wang, Y.P., Wang, D. N., Jin,W., Rao,Y.J. ve Peng, G.D., "Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of CO2 laser to carve periodic grooves on the optical fiber", **Applied Physics Letters**, Cilt 89, No 15, 151105, 2006.
8. Wang, Y., Jin, W., Ju, J., Xuan, H., Ho, H.L, Xiao, L. Ve Wang, D., "Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers," **Optics Express**, Cilt 16, No 4, 2784-2790 2008.
9. Rego, G., Marques, P.V.S., Salgado, H.M. ve Santos, J.L., "Simultaneous measurement of temperature and strain based on arc-induced long-period fibre gratings", **Electronics Letters**, Cilt 41, No 2, 60-62, 2005.
10. Rego, G., Santos, J.L. ve Saldago, H.M., "Polarization dependent loss of arc-induced long-period fibre gratings", **Optics Communications**, Cilt 262, No 2, 152-156, 2006.
11. Petrovic, J.S., Dobb, H., Mezentsev, V.K., Kalli, K., Webb, D.J. ve Bennion, I., "Sensitivity of LPGsin PCFs fabricated by an electric arc to temperature, strain, and external refractive index", **IEEE J. of Lightwave Technology**, Cilt 25, No 5, 1306-1312, 2007.
12. Rego, G., Marques, P.V.S., Santos, J.L.ve Saldago, H.M., "Estimation of the Fibre Temperature during the Inscription of Arc-Induced Gratings", **Optics Communications**, Cilt 259, No 2, 620-625, 2006.
13. Rego, G., Santos, J.L. ve Saldago, H.M. "Refractive Index Measurement with Long-Period Gratings Arc-Induced in Pure-Silica-Core Fibres", **Optics Communications**, Cilt 259, No 2, 598-602, 2006.
14. Mihailov, S. J., Grobncic, D., Huimin, D., Smelser, C.W. ve Jes, B., "Femtosecond IR laser fabrication of Bragg gratings in photonic crystal fibers and tapers", **IEEE Photonics Technology Letters**, Cilt 18, No 17, 1837-1839, 2006.
15. Rego, G., "Polarization dependent loss of mechanically induced long-period fibre gratings", **Optics Communications**, Cilt 281, No 2, 255-259, 2008.
16. Lin, C.Y., Chern, G.W. ve Wang, L.A., "Periodical corrugated structure for forming sampled fiber Bragg grating and long-period fiber grating with tunable coupling strength", **Lightwave Technology**, Cilt 19, No 8, 1212-1220, 2001.
17. Von Bibra, M. L., Roberts, A. ve Canning J., "Fabrication of long-period fiber gratings by use of focused ion-beam irradiation", **Optics Letters**, Cilt 26, No 11, 765-767, 2001.
18. Chan, F.Y.M. ve Chiang, K.S., "Analysis of Apodized Phase-Shifted Long-Period Fiber Gratings", **Optics Communications**, Cilt 244, No 1-6, 233-243, 2005.
19. Guler, N.F., Navruz, I., "The Optical Grating Based Solutions for Dispersion Compensation in Optical Communication Systems", **J. of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 21, No 1, 129-136, 2006.
20. Rego, G. ve Ivanov O., "Investigation of the mechanisms of formation of long-period gratings arc-induced in pure-silica-core fibres", **Optics Communications**, Cilt 284, No 8, 2137-2140, 2011.
21. Zhang, A.P., Chen, X.W., Guan, Z.G., He, S., Tam, H.Y. ve Chung, W.H., "Optimization of Step-Changed Long-Period Gratings for Gain-Flattening of EDFAs", **IEEE Photonics Technology Letters**, Cilt 17, No 1, 121-123, 2005.