

Polarization-controlled Interleaved Signal Gating Fiber Device

李 鎔 旭<sup>†</sup>  
(Lee Yong Wook)

**Abstract** In this paper we fabricated a fiber device composed of cascaded long-period fiber gratings between which a birefringent erbium-doped fiber was inserted and proposed its application as a polarization-controlled interleaved signal gating fiber device. Because the core and cladding modes of the fabricated fiber device have polarization-dependent phase difference due to the birefringence of the erbium-doped fiber, its interference spectrum can be modulated by varying the input polarization.

**Key Words** : Optical Fiber Device, Polarization, Interleaving, Long-Period Fiber Grating, Erbium-Doped Fiber

1. 서 론

복굴절 (birefringence) 이 거의 없는 단일 모드 광섬유 (single-mode fiber; 이하 SMF) 에 제작된 장주기 광섬유 격자 (long-period fiber grating; 이하 LPFG) 두 개를 일정한 길이의 광섬유로 거리를 두고 직렬로 연결한 장주기 격자쌍에 광대역 광원 (broadband light source) 을 입사시켰을 경우, 일반적으로 그 출력은 간섭 무늬 스펙트럼 (interference fringe spectrum) 을 나타낸다. 이는 첫번째 LPFG에 의해 클래딩 모드 (cladding mode) 로 결합 (coupling) 된 코어 모드 (core mode) 가 나머지 LPFG에 의해 다시 코어 모드로 재결합될 수 있고, 재결합된 코어 모드는 첫번째 LPFG에서 결합되지 않고 두번째 LPFG까지 도달한 코어 모드와 서로 만나 간섭을 일으키기 때문이다 [1]. 그런데, 두 LPFG 사이에 있는 광섬유의 코어·클래딩간 굴절률 (refractive index) 차이에 변화를 줄 수 있다면, 출력되는 간섭 스펙트럼의 모양을 변화시킬 수 있다. 본 논문에서는 어븀 첨가 광섬유 (erbium-doped fiber; 이하 EDF) 의 복굴절을 이용하여 [2], 두 LPFG 사이에 EDF를 연결한 광섬유 소자 [3] 를 제작하고, 제안된 소자가 일반 SMF로 제작된 장주기 격자쌍에 비해 편광 (polarization) 의존성이 강함을 보였고, 이 소자가 파장 밴드 (waveband) 를 이용하는 광 네트워크 (optical network) 에서 편광으로 조절되는 인터리빙 신호 게이팅 소자 (interleaved signal gating device) 로 사용될 수 있음을 제시하였다.

2. 간섭 스펙트럼의 변조 원리

광통신 및 광 네트워크에 사용되는 일반적인 SMF에 비해 복굴절이 큰 EDF [2] 를 직렬로 연결된 두 LPFG 사이에 연결하여 장주기 격자쌍을 만들게 되면 [3], 입력되는 광신호의 편광 상태를 조절함으로써 첫번째 LPFG에서 클래딩 모드로 결합이 되지 않고 EDF의 코어를 진행하는 코어 모드의 위상 지연 (phase retardation) 에 변화를 줄 수가 있다. EDF를 진행하는 코어·클래딩간의 입력 편광에 따른 위상차 (phase difference) 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = [n_{eff}^{core}(P) - n_{eff}^{clad}(P)]k_0D$$

여기에서,  $P$ 는 입력 광신호의 편광 상태를,  $n_{eff}^{core}(P)$ 와  $n_{eff}^{clad}(P)$ 는 각각 EDF의 코어와 클래딩의 유효 굴절률을 의미한다. 그리고,  $k_0$ 와  $D$ 는 각각 자유 공간에서의 전파 상수, 두 LPFG 간의 거리를 의미한다. 그리고, 위상 정합 조건 (phase matching condition) 을 만족하는 정규화된 투과 세기 (normalized transmitted intensity) 는 다음과 같이 표현할 수 있으며, 이는 입력 광신호의 편광 상태에 의존한다 [1]. 단,  $\kappa$ 는 커플링 상수,  $L$ 은 LPFG의 길이이다.

$$I(P) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2(2|\kappa|L) [1 + \cos(\Delta\phi)]$$

위와 같은 계산을 토대로 하여 EDF의 복굴절이 장주기 격자쌍의 투과 스펙트럼의 변조에 주는 영향을 살펴보기 위해, 두 가지 경우에 대해서 제안된 소자의 투과 스펙트럼을 이론적으로 계산해보았다. 여기서 두 가지 경우는 입력 편광 (input polarization) 이 각각 EDF의 두 복굴절 축 (birefringent axis) 에 맞춰 입사될 경우를 의미한다. (이 두

<sup>†</sup> 교신저자, 正 會 員 : 韓國電子通信硏究員 先任硏究員  
E-mail : dorawoot@chol.com  
接受日字 : 2007年 8月 3日  
最終完了 : 2007年 8月 26日

입력 편광은 일반적으로 직교하는 성질을 가진다.) 이론적인 계산에서 LPFG의 길이와 두 LPFG 사이의 거리는 각각 30 mm와 81 mm이었으며, 두 LPFG의 결합 비율 (coupling ratio)은 넓은 파장 대역에서의 간섭 스펙트럼 발생을 위해 모두 6 dB로 주었다. 그리고, EDF의 복굴절은 첫번째 LPFG에서 결합되지 않고 EDF의 코어를 진행하는 두 직교 편광이  $\pi$ 만큼의 위상차를 갖도록 조절되었다. 그림 1은 두 LPFG 사이에 EDF를 연결한 장주기 격자쌍에 하나의 복굴절 축에 맞게 입력 편광이 입사된 경우 (원형 기호)와 나머지 복굴절 축에 맞게 입사된 경우 (마름모형 기호)의 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 그리고, 실선으로 표시된 스펙트럼은 장주기 격자쌍에 사용된 동일한 두 LPFG들의 투과 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 결합되지 않고 EDF의 코어를 진행하는 모드에 위상 지연을 일으킴으로써 장주기 격자쌍의 결과적인 투과 스펙트럼을 변화시킬 수가 있었다. 만약 두 개의 직교하는 입력 편광에 대해 그 위상 지연의 차이가  $\pi$ 만큼이 될 수 있도록 해주는 복굴절을 갖는 EDF를 사용한다면, 입력 편광을 90도씩 조절함으로써 투과 스펙트럼을 단일 채널 폭 (channel width)의 반만큼 이동시키는 스위칭 즉, 인터리빙 신호 게이팅이 가능하다. 본 계산에서 EDF와 SMF간의 코어 크기 불일치 (mismatch)와 코어-클래딩간 굴절을 불일치, EDF의 흡수 계수 (absorption coefficient)와 편광 의존 손실 (polarization-dependent loss), 그리고 LPFG의 UV에 의한 복굴절 (UV-induced birefringence)과 접합 손실 (splicing loss) 등은 고려되지 않았다.

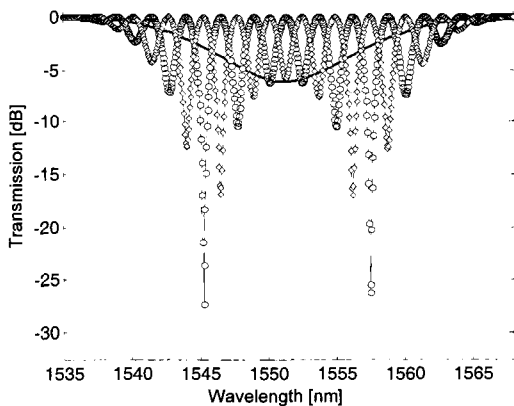


그림 1 이론적으로 계산된 EDF가 삽입된 장주기 격자쌍의 투과 스펙트럼  
 Fig. 1 Calculated transmission spectra of the cascaded LPFGs between which the EDF is inserted

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 제작된 광섬유 소자의 편광 의존성을 조사하기 위한 실험 구성도를 나타내고 있다. 어븀 첨가 광섬유 증폭기 (erbium-doped fiber amplifier; 이하 EDFA)는 광대역 광원으로 사용되었고, 입력 광신호의 편광 상태를 바꾸기 위해서 편광 조절기 (polarization controller)를 사용하였다. 사용된 편광 조절기는 회전 가능한 선형 편광기 (linear

polarizer)와 1/4 파장판 (quarter-wave plate), 그리고 1/2 파장판 (half-wave plate)으로 구성되었다. 그리고, 출력 스펙트럼은 광 스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer)를 통해 분석하였다. 또한, 측정시 외란에 의한 광섬유에서의 편광 상태 변화를 최소화하기 위해, 모든 소자들은 셀로판 테이프를 사용하여 고정시켰다. 제작된 EDF를 삽입한 장주기 격자쌍 소자는 30 mm 길이의 동일한 LPFG 2개와 79 mm 길이의 EDF로 구성되어 있으며, LPFG 사이의 거리는 81 mm이었다. 사용된 EDF의 어븀 이온 농도 (erbium-ion concentration)와 복굴절은 각각  $\sim 1000$  ppm과  $\sim 1 \times 10^{-5}$  정도였다.

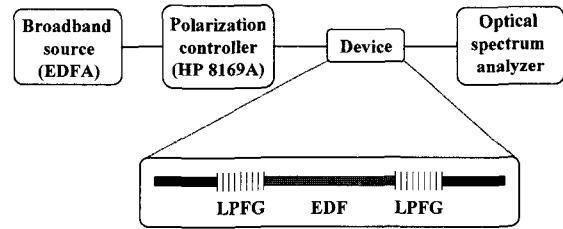


그림 2 실험 구성도  
 Fig. 2 Experimental setup

그림 3은 선형 편광기의 각도 (orientation angle)가  $37.5^\circ$ 와  $127.5^\circ$ 일 경우 제작된 소자의 투과 스펙트럼을 각각 실선과 점선으로 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 선형 편광기의 각도에 따라 스펙트럼의 골 (dip)과 산 (peak)이 서로 역전되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 직교하는 입력 편광에 대해서 채널 폭의 반만큼 스위칭이 되는 것을 알 수 있다. 이것은 제작된 소자에 사용된 EDF의 복굴절이 첫번째 LPFG에 결합되지 않고 EDF를 진행하는 직교하는 편광을 가지는 두 코어 모드가  $\pi$ 만큼의 위상차를 갖도록 해준다는 것을 의미한다. 제작된 소자에서는 좀 더 넓은 파장 영역에서 간섭 스펙트럼을 얻기 위해서 3 dB 이상의 결합 비율을 갖는 LPFG를 사용하였으며, 소자의 삽입 손실 (insertion loss)은 두 LPFG 간의 스펙트럼 불일치 (spectral inequality), 접합 손실, EDF의 흡수 손실 ( $3.5$  dB/m @  $1530$  nm) 등으로 인해 발생하였다.

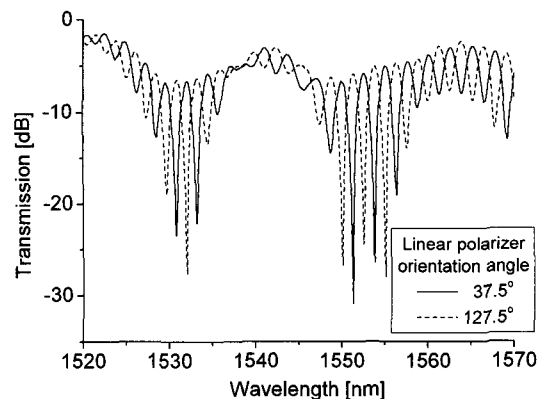


그림 3 EDF를 장주기 격자쌍 사이에 삽입하여 제작된 소자의 측정된 투과 스펙트럼  
 Fig. 3 Measured transmission spectra of the fabricated device (cascaded LPFGs between which the EDF is inserted)

그림 4는 1529 nm에서 1534 nm까지의 관심 있는 파장 대역에서, 제작된 소자의 투과 스펙트럼을 선형적인 크기로 나타낸 것이다. 실선으로 표시되는 특정한 선형 편광기 각도 (37.5°) 에서는 간격이 ~2.46 nm인 두 채널이 통과 (on) 될 때 동시에 이 두 채널들에 대해 각각 채널 폭의 반 (~1.23 nm) 만큼 떨어진 두 채널은 차단 (off) 되고, 점선으로 표시되는 또 다른 특정 각도 (127.5°) 에서는 그 역의 동작이 수행되는 것을 확인할 수 있다. 통과되는 채널과 차단되는 채널간의 평균 채널 간격은 ~1.23 nm (155 GHz @ 1550 nm) 이었다. 이 채널 간격은 광통신용 표준 파장 간격에 해당하지는 않으나, 두 LPFG간의 간격을 조절함으로써 이 채널 간격을 맞출 수 있다. 특히, 각 채널의 투과 손실은 소자 제작에 사용되는 LPFG의 스펙트럼을 거의 동일하게 만들거나, 접합 손실을 줄이고, 또 흡수율이 작고 적절한 복굴절을 가지는 EDF를 사용하면 향상 시킬 수 있다. 따라서 위와 같은 스펙트럼 상의 신호 게이팅 동작을 고려해볼 때, 제안된 소자는 편광 조절기만으로 동작시킬 수 있는 간단한 구조의 인터리빙 신호 게이팅 소자로서 사용될 수 있을 것이다.

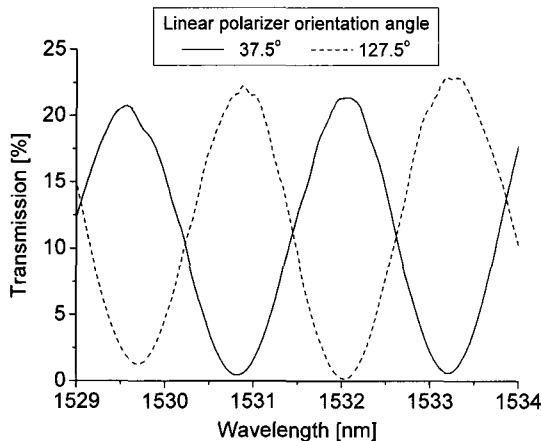


그림 4 입력 편광 상태에 따른 인터리빙 신호 게이팅 동작  
 Fig. 4 Interleaved signal gating operation depending on input polarization

#### 4. 결 론

본 논문에서는 적절한 복굴절을 가지는 EDF를 LPFG 사이에 연결하여 소자를 제작하고, 제작된 소자의 입력 편광에 따른 투과 스펙트럼의 변화 양상을 조사하였으며, 특히, 직교하는 입력 편광에 대해 인터리빙 신호 게이팅이 가능한 EDF의 복굴절 조건을 이론과 실험으로 입증하였다. 그리고, 제작된 소자의 편광에 의존하는 투과 스펙트럼 특성을 이용하여, 제안된 소자가 향후 파장 밴드 기반 광 네트워크에서 편광으로 조절되는 간단한 인터리빙 신호의 게이팅 소자로 사용될 수 있음을 제시하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원의 "High Risk High Return Project" 사업의 일환으로 수행하였음.

#### 참 고 문 헌

[1] E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. S. Kurkov, O. I. Medvedkov, and V. N. Protopopov, "In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings," 22nd European Conference on Optical Communication, MoB.3.6, pp. 1. 65-68, 1996.

[2] A. Eyal, N. Friedman, and M. Tur, "Wavelength dependence of the principal states of polarization in short segments of doped fiber," 10th Meeting on Optical Engineering in Israel, Proc. SPIE, vol. 3110, pp. 415-422, Sep. 1997.

[3] J. Jung, Y. W. Lee, and B. Lee, "High-resolution interrogation technique for fiber Bragg grating strain sensor using long period grating pair and EDF," 14th International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. SPIE, vol. 4185, pp. 114-117, Oct. 2000.