

광자결정 광섬유기반 광신호 분배기 개발

윤민석¹ · 이상배² · 한영근^{1†}

¹한양대학교 물리학과
 ⑨ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 17

²한국과학기술연구원
 ⑨ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

(2010년 8월 24일 받음, 2010년 10월 11일 수정본 받음, 2010년 10월 13일 게재 확정)

본 논문에서는 광자결정 광섬유를 이용하여 1000 nm 의 광대역폭을 갖는 광신호 분배기를 구현하였다. 제작에 사용된 광자결정 광섬유의 지름은 130 μ m 이고 6층의 공기 구멍 구조로 이루어져 있다. 광신호 분배기는 두 가닥의 광자결정 광섬유에 열을 가함과 동시에 인장력을 가해 제작하였으며 제작된 광자결정 광섬유 기반 광신호 분배기의 지름은 23 μ m 이었다. 광신호 분배기의 제작 시 인장시키는 길이에 따라 대역폭과 bandedge가 조절되었다. 제작된 광자결정 광섬유 기반 광신호 분배기의 대역폭이 1000 nm에서 50:50의 광신호 분해 효율을 가지는 것으로 측정되었다. 광자결정 광섬유의 공기 구멍 구조의 특성으로 인해 주변 온도의 변화에 영향을 받지 않는 특성을 나타낸다. Optical coherence tomography의 분해능이 광원의 대역폭에 비례하므로 광대역폭을 갖는 광자결정 광섬유 기반 광신호 분배기는 신호 추출을 위한 간섭계 구성에 핵심적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Development of a Ultra Broadband Optical Coupler Based on a Photonic Crsytal Fiber

Min-Seok Yoon¹, Sang-Bae Lee², and Young-Geun Han^{1†}

¹Department of Physics, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seoungdong-gu, Seoul 139-701, Korea

²Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-dong, Wolsong-gil 5, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

(Received August 24, 2010; Revised manuscript October 11, 2010; Accepted October 13, 2010)

A broadband optical coupler with a broad bandwidth of 1000 nm based on a photonic crystal fiber (PCF) is investigated. The PCF has 6 layers of air hole structures and a diameter of 130 μ m. The PCF-based coupler is fabricated by using a fused biconical tapering method based on heating and elongation processes. Changing temperature and an elongation length can control the bandwidth and the bandedge wavelength of the PCF-based broadband coupler. The diameter of the fused region in the PCF-based coupler was measured to be 23 μ m. The fabricated PCF-based coupler has a nearly-flat coupling ration of 3-dB in a broad bandwidth of 1000 nm, which is wider than that of the previously reported PCF-based coupler and that of the single-mode-fiber-based coupler. Since the resolution of optical coherence tomography system is proportional to the bandwidths of both an optical light sources and an interferometer, the fabricated PCF-based broadband optical coupler has a great potential for realization of a broadband interferogram.

Keywords: Photonic crystal fiber, Optical coupler, Optical coherence tomography

OCIS codes: (060.1810) Buffers, couplers, routers, switches, and multiplexers; (060.2310) Fiber optics; (060.2340) Fiber optics component

I. 서 론

정보 통신 시스템과 파장 다중 분할 통신 시스템의 발달에

따라 광대역을 갖는 광소자들에 대한 중요성이 부각되고 연구가 활발해 지고 있다. 광자결정 광섬유는 광대역 단일모드 특성과 독특한 분산특성, 높은 비선형성으로 인하여 광대역

[†]E-mail: yghan@hanyang.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

을 갖는 광소자의 재료로 주목 받아 왔으며, 그 결과 고 굴절률 광자결정 광섬유 루프 미러, supercontinuum 광원, 모드 결합을 이용한 광자 결정 광섬유 소자 와 같은 광자결정 광섬유 기반의 소자들이 활발히 개발되어 왔다¹¹⁻¹⁷. 광자결정 광섬유는 실리카 코어 주변에 공기층이 주기적으로 분포해 있는 구조로 주기적인 공기층의 분포로 인하여 발생하는 photonic bandgap 효과를 이용하여 빛을 코어로 진행 시킨다. 코어 주변의 공기층이 주기적으로 분포해 있는 경우 공기층의 직경과 공기층 간의 거리를 조절하여 클래딩의 유효 굴절률 및 정규화 주파수 등을 조절 할 수 있다^{18, 19}. 기존의 단일 모드 광섬유는 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 0.35%이내에 불과하지만 광자결정 광섬유의 경우 공기층의 직경과 공기층 간의 거리를 조절함으로써 높은 클래딩의 유효 굴절률을 얻을 수 있기 때문에 기존의 광섬유로는 구현하기 힘든 새로운 특성들을 쉽게 얻을 수 있다. 광자결정 광섬유는 주로 수십 또는 수백 개의 실리카 튜브와 코어의 역할을 할 실리카 봉을 적층시켜 고온을 인가하면서 인장시키는 방법인 모세관 적층 방법으로 제작된다. 광자결정 광섬유 분배기는 이러한 광자결정 광섬유 기반의 중요한 소자 중 하나로 단일모드 광섬유 분배기와는 달리 광대역에 걸쳐 편평한 형태의 결합 비율을 갖는 특성을 나타내며 이러한 특성은 optical coherence tomography (OCT)와 파장 다중 분할 통신 시스템과 같은 광대역의 소자를 요하는 분야에 유용하게 쓰일 가능성이 크다. 광자결정 광섬유 분배기는 주로 2개의 D 형태의 광자결정 광섬유를 접합하는 방법과 두 가닥의 광자결정 광섬유를 꼬아 인장시키는 방법인 fused biconical tapered (FBT) 방법으로 제작된다.

본 논문에서는 6층 구조의 공기 구멍을 가지는 광자결정 광섬유에 FBT 방법을 적용하여 광자결정 광섬유 분배기를 제작하고 제작된 광자결정 광섬유 분배기의 주변 환경의 온도 변화에 따른 특성과 제작 시 광섬유를 늘리는 길이에 따른 특성을 측정 하였다. 제작된 광자결정 광섬유 광신호 분배기는 700 ~ 1700 nm 의 대역폭에 3 dB 결합비를 나타내었으며 넓은 대역폭에 걸쳐 3 dB 결합비를 갖도록 하기 위해서는 FBT 방법으로 제작하는 과정에서 광자결정 광섬유의 공기층이 파괴되지 않도록 하기 위해 가열하는 온도, 늘리는 길이, 늘리는 속도 등의 요소들을 정확하게 조절하였다.

II. 실험 과정 및 결과

광섬유 기반 광신호 분배기의 제작은 광섬유를 열과 장력을 가해 인장하면 클래딩의 직경이 감소하면서 코어의 직경이 줄어들고 코어에 도파되는 빛의 소산장 (evanescent field)의 크기가 상대적으로 증가하고, 소산장의 크기가 줄어드는 클래딩의 직경보다 클 경우 소산장이 다른 쪽 광섬유로 분배되는 원리에 기인한다.

본 실험에서는 광자결정 광섬유 분배기를 제작하기 위해 모세관 적층 방법을 이용해 6층의 주기적인 공기층을 갖는 구조의 광자결정 광섬유를 제작 하였다. 120개의 모세관을

제작하고자 하는 형태로 적층한 뒤 광섬유의 코어부분을 만들기 위해 가운데의 모세관을 실리카 봉으로 대체 한다. 적층된 모세관은 석영 튜브에 삽입하여 전기로를 이용해 인장하는 과정을 통해 광자결정 광섬유가 제작된다. 그림 1은 제작된 광자결정 광섬유의 단면 사진이다. 광자결정 광섬유는 6층의 주기적인 공기층의 구조로 이루어져 있으며 공기층의 직경과 공기층 간의 거리 코어의 직경은 각각 3.0 μm , 5.2 μm , 그리고 7.0 μm 이다.

이 광자결정 광섬유에 FBT 방법을 적용해 넓은 대역폭을 갖는 광자결정 광섬유 분배기를 제작 하였다. 그림 2는 FBT 방법을 이용해 광자결정 광섬유 분배기를 제작하는 개략도를 나타내고 있다. FBT 시스템은 white light source (ANDO AQ4305), 자동 이동 스테이지, 열원으로 쓰일 liquefied petroleum gas (LPG) flame, 광스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer (OSA), ANDO AQ-6315B)로 이루어져 있다. 광자결정 광섬유 분배기는 한 쌍의 광자결정 광섬유를 꼬아 광섬유의 중방향으로 움직이는 열원으로 광섬유에 열을 가함과 동시에 자

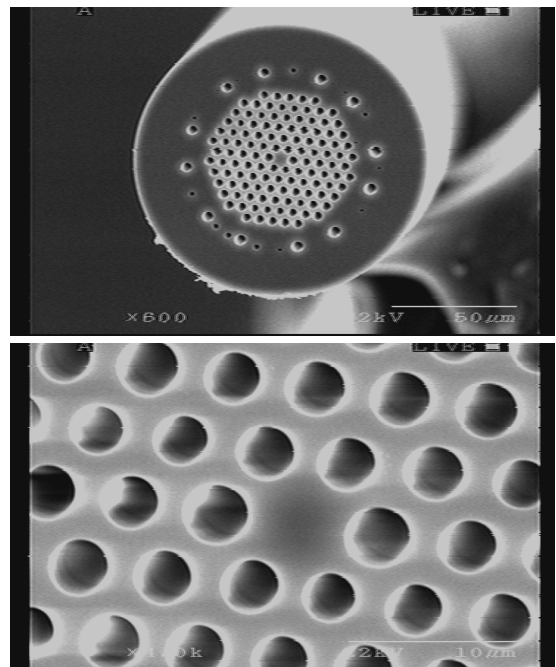


FIG. 1. Scanning electron microscope (SEM) image of the cross-section of the PCF.

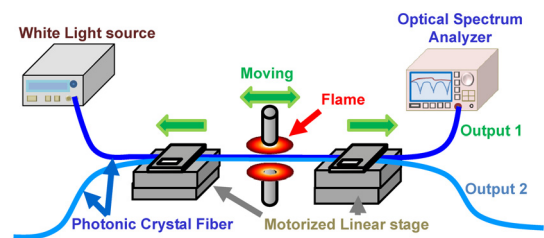


FIG. 2. Experimental setup for fabrication of the PCF-based coupler.

동 이동 스테이지에 광섬유의 양 끝단을 고정 후 인장시켜 제작한다. 이 때 고려하여야 할 요소로는 인장 속도, 열원의 온도, 열원의 이동속도, 열원과 광섬유와의 거리 등이 있다. 광자결정 광섬유 분배기의 특성을 측정하기 위해 White light source에서 나오는 빛을 광자결정 광섬유에 통과 시킨 뒤 광스펙트럼 분석기로 관찰하였다. 특히 두 광자결정 광섬유 사이에서 결합되기 시작하면 결합비가 급격하게 변하기 때문에 인장 속도를 정확하고 정밀하게 조절해야 한다. 인장 속도는 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 를 유지하였다. 광자결정 광섬유 분배기 제작에 있어서 다른 중요한 요소로 열원의 온도이며 온도가 너무 높은 경우 광자결정 광섬유의 공기층이 파괴되어 좋은 50:50의 결합비를 얻기가 어려워져 광자결정 광섬유 분배기의 분배효율이 저하된다.

그림 3은 열원의 온도에 따른 광자결정 광섬유 분배기의 분배 효율을 나타낸다. (a), (c)는 광자결정 광섬유 분배기를 제작할 때 열원의 온도가 700°C 일 때의 광자결정 광섬유 분배기의 단면사진과 광학특성을 나타내고 (b), (d)는 열원의 온도가 800°C 일 때의 단면사진과 광학특성이다. 두 경우 모두 일반적인 단일모드 광섬유 기반 광신호 분배기의 대역폭보다 훨씬 넓은 범위에서 3 dB의 결합비를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이러한 광자결정 광섬유 분배기의 우수한 투과 특성은 광자결정 광섬유의 광대역 단일모드 특성에 기인한다^[11]. 광자결정 광섬유 분배기에서의 결합 세기 (coupling strength)는 빛의 파장에 반비례하고 분배기의 코어 모드들의 겹침 적분값 (overlap integral)에 비례한다. 여기서 코어 모드의 직경은 광자결정 광섬유의 공기층의 간격과 크기에 의해 결정된다. 공기 구멍 크기 대 공기 구멍간의 간격의 비가 줄어들면 모드의 유효면적이 증가하고 유효면적의 파장에 대한 종속성이 커지고 유효면적이 파장에 종속됨으로 인하여 겹침 적분값 이 파장에 더욱 비례하게 된다. 따라서 결합 세

기는 파장에 무관하게 되어 버리고 그 결과 광자결정 광섬유 분배기의 50:50의 결합비율이 넓은 파장영역에 형성된다^[11]. 그림 3(a)의 경우 광자결정 광섬유의 공기층 구조가 잘 유지되어 있음을 볼 수 있다. 반면 그림 3(b)에서는 광자결정 광섬유의 공기층 구조가 수축되거나 붕괴되어 있다. 각각의 광학적 특성을 살펴보면 그림 3(c)의 경우 결합비가 넓은 파장 영역에 걸쳐 50:50의 결합비 특성을 나타내는 반면 그림 3(d)의 경우 불규칙한 결합비 특성이 나타나고 있다. 이를 통해 고효율의 50:50 결합비 특성을 갖는 광자결정 광섬유를 제작하기 위해서는 제작과정에서 공기층의 구조가 수축되거나 붕괴되지 않게 적당한 온도를 잘 유지해야 하고 자동 이동 스테이지의 속도를 조절해 적당한 세기의 인장력을 인가해야 한다. 실험에서 열원의 온도와 인장 속도를 공기층 구조가 잘 유지되도록 최적화 시켰기 때문에 그림 3(c)와 같이 넓은 파장영역에 걸쳐 50:50 결합비를 나타내는 광섬유 분배기를 제작 할 수 있었다. 열을 가함과 동시에 꼬여있는 두 가닥의 광섬유를 인장시키는 과정을 살펴보면, 처음 인장을 시작하였을 때는 아직 광섬유간 coupling 이 일어날 조건이 안되기 때문에 두 출력 단자에서 별다른 변화를 관찰 할 수 없다. 인장 길이가 15 mm 정도 되었을 때 두 출력 단자의 광 결합비가 장파장 영역부터 천천히 변화하기 시작하고 인장 길이가 18 mm 가 되었을 때 50:50의 결합비를 나타내는 지점이 나타난다. 이 이후의 과정을 그림으로 살펴보면 아래와 같다.

그림 4(a)는 광자결정 광섬유 기반 광신호 분배기를 제작

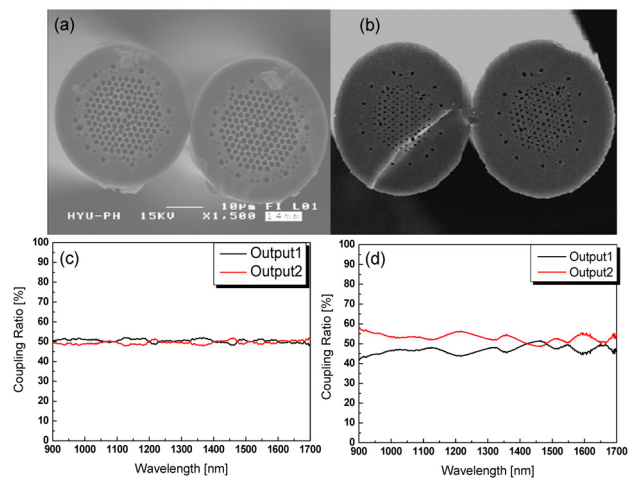


FIG. 3. SEM image of the cross-section of the PCF-based coupler and measured output spectra for different heating temperatures: (a), (c) for a heating temperature of 700°C and (b), (d) for a heating temperature of 800°C.

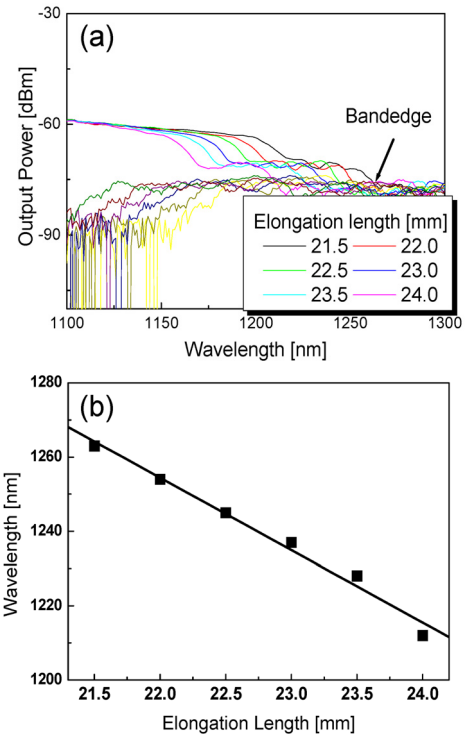


FIG. 4. Bandedge shift (a) and bandwidth change (b) as functions of elongation lengths.

할 때의 인장 길이에 따른 분배기의 광학 특성을 나타낸 것으로 광신호 분배가 이루어지는 과정에서 bandedge의 이동 정도를 나타내고 있다. 인장 길이에 따른 bandedge 변화를 측정하기 위해서 해당 파장 영역에서 두 출력단자의 스펙트럼을 측정하였다. 인장시의 불꽃의 온도는 700°C이며, bandedge는 광자결정 광섬유 분배기의 결합비가 50:50이 시작되는 지점이다. 그림 4(b)는 인장길이에 따른 bandedge의 이동 정도로 광자결정 광섬유 분배기는 인장 길이를 늘릴수록 bandedge가 단파장대로 이동하는 특성을 보였고 인장길이가 2 mm 늘어났을 때 bandedge가 단파장 방향으로 35 nm 이동했다. 이를 이용하면 광자결정 광섬유 분배기를 제작할 때 대역폭과 중심파장의 선택이 가능해 진다.

그림 5에서는 온도 변화에 따른 광자결정 광섬유 기반 광신호 분배기의 대역폭 변화를 나타내고 있다. 외부온도를 20°C에서 180°C까지 증가시켰으나 대역폭 변화는 크지 않았으며 평균적으로 약 ±1.3 nm의 변화를 나타내는 것으로 측정되었다. 이것은 광자결정 광섬유가 단일 물질인 실리카로만 이뤄

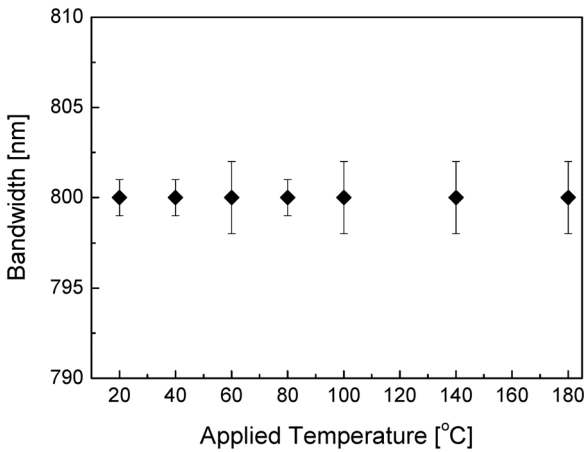


FIG. 5. Bandwidth fluctuation with temperature change.

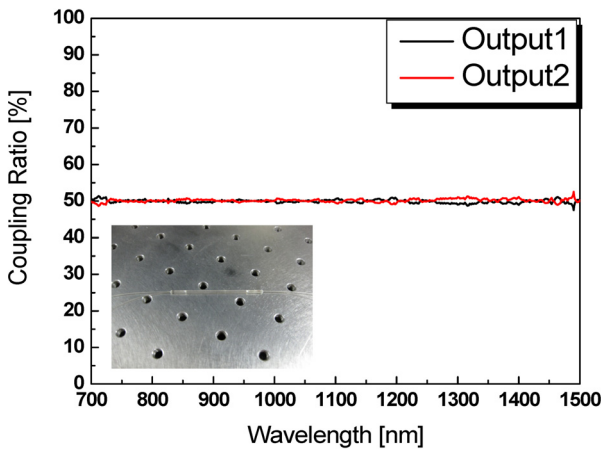


FIG. 6. Output spectra measured at two output ports of the fabricated PCF-based coupler.

져 있으므로 온도 변화에 따른 굴절을 변화가 작기 때문에 광 결합 현상이 온도에 따라 크게 변하지 않으므로 온도 변화에 따른 광신호 분배기의 대역폭 변화가 작게 나타나는 것으로 사료되며 이에 따라 20°C 이하의 온도에서도 대역폭의 변화는 크지 않을 것이라 유추할 수 있다.

그림 6는 FBT 방법을 이용해 완성된 광자결정 광섬유 분배기의 투과 특성을 백색 광원 (white light source)를 이용하여 측정한 것이다. 열온의 온도는 700°C로 일정하게 유지하였으며 실험실의 온도 변화는 최대한 억제하여 온도 변화가 ±2°C가 유지되었고 인장 길이를 정밀하게 조절하여 최종적으로 광자결정 광섬유 분배기를 제작하였다. 실험 결과 광자결정 광섬유 분배기는 OSA의 측정 한계 범위인 700 ~ 1700 nm 에 걸쳐 1000 nm의 파장 영역에 50:50의 결합비를 갖는 대역폭을 형성함을 알 수 있다. 광자결정 광섬유의 삽입 손실이 1.6 dB로 높기 때문에 분배기를 제조한 후에도 높은 삽입 손실을 보였으며 측정 결과는 1553.5 nm 파장에서 2.3 dB로 나타났다. 그리고 50:50 결합비를 갖는 대역폭에서의 삽입 손실의 변화가 존재하였으며 변화폭은 0.5 dB로 측정되었다. 편광 의존 손실은 1553.5 nm에서 0.7 dB로 측정되었다. 제작된 광자결정 광섬유 분배기는 V자 형태의 홈이 파인 석영관과 UV 에폭시를 이용해 보호처리 하여 원치 않는 구부림과 장력으로부터 보호하였다. 그림 6에서 실제 홈이 파인 석영관에 패키징 처리한 광자결정 광섬유 기반 광신호 분배기의 사진을 나타내고 있다. 제조된 광자결정 광섬유 분배기의 1000 nm에 이르는 넓은 대역폭 특성은 파장 다중 분할 시스템과 OCT 시스템과 같은 넓은 대역폭의 사용을 필요로 하는 소자에 적용 시 기존의 200 nm로 제한되어 있던 단일 모드 광섬유 분배기의 대역폭으로 인한 한계를 극복할 수 있을 것으로 사료된다. 특히, OCT 시스템의 경우 OCT 시스템의 분해능이 사용 가능한 대역폭의 크기에 비례하기 때문에 광자결정 광섬유 분배기를 이용하면 고 분해능의 OCT 시스템의 구성이 가능할 것이다.

III. 결 론

본 논문에서는 대역폭이 1000 nm 인 광자결정 광섬유 기반 광섬유 분배기를 제작하고 그 광학적 특성을 파악 하였다. 육각형 모양의 6층의 공기층 구조를 갖는 광자결정 광섬유를 모세관 적층 방법을 이용하여 제작하였고 공기층의 지름과 공기층간 간격, 코어의 지름은 각각 3.0 μm, 5.2 μm, 그리고 7.0 μm로 측정되었다. 제작된 광자결정 광섬유를 FBT 방법에 적용하여 넓은 대역폭의 광자결정 광섬유 분배기를 제작하였고 광자결정 광섬유 분배기를 제작할 때 인장 길이에 따른 대역폭과 중심파장의 조절이 가능함을 확인하였다. 제작된 광자결정 광섬유 분배기의 넓은 대역폭 특성을 이용하면 파장 다중 분할 시스템을 위한 다양한 광소자와 OCT 시스템과 같은 넓은 영역의 파장 대역폭을 필요로 하는 간섭계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울특별시가 주관하는 「서울시 산학연 협력사업」의 일환인 「2009년도 신기술 연구개발 지원사업」의 지원에 의하여 수행되었습니다(ST090815).

References

1. T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* **22**, 961-963 (1997).
2. D. Mogilevtsev, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, "Group-velocity dispersion in photonic crystal fibres," *Opt. Lett.* **23**, 1662-1664 (1998).
3. N. G. R. Broderick, T. M. Monro, P. J. Bennett, and D. J. Richardson, "Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities," *Opt. Lett.* **24**, 1395-1397 (1999).
4. C.-L. Zhao, X. Yang, C. Lu, W. Jin, and M. S. Demokan, "Temperature-insensitive interferometer using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 2535-2537 (2004).
5. T. A. Birks, W. J. Wadsworth, and P. St. J. Russell, "Supercontinuum generation in tapered fibers," *Opt. Lett.* **25**, 1415-1417 (2000).
6. J. H. Lim, K. S. Lee, J. C. Kim, and B. H. Lee, "Tunable fiber gratings fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure," *Opt. Lett.* **29**, 331-333 (2004).
7. J. H. Lim, H. S. Jang, K. S. Lee, J. C. Kim, and B. H. Lee, "Mach-Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings," *Opt. Lett.* **29**, 346-348 (2004).
8. G. H. Kim, T. Y. Cho, K. J. Hwang, K. I. Lee, K. S. Lee, Y. G. Han, and S. B. Lee, "Strain and temperature sensitivities of an elliptical hollow-core photonic bandgap fiber based on sagnac interferometer," *Opt. Express* **17**, 2481-2486 (2009).
9. D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguide*, 2nd ed., (Academic Press, New York, USA, 1991), Chapter 3.
10. N. A. Mortensen, "Effective area of photonic crystal fiber," *Opt. Express* **10**, 341-348 (2002).
11. H. Kim, J. Kim, U. C. Paek, and B. H. Lee, "Tunable photonic crystal fiber coupler based on a side-polishing technique side-polishing technique," *Opt. Lett.* **29**, 1194-1196 (2004).