

편광 유지 광섬유를 이용한 Bragg Grating 센서 제작*

김철진 · 박태상 · 이상배 · 최상삼

한국과학기술연구원 정보전자연구부

정 해 양

경희대학교 물리학과 및 레이저 공학 연구소

(1997년 3월 31일 받음)

광섬유 격자는 외부의 가해진 물리량에 대해 선형적인 응답을 하며, 광섬유 격자의 파장 인코딩 특성으로 인해 S/N비가 높은 신호 처리를 할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 편광 유지 광섬유 격자를 이용한 압력 센서에 관한 실험을 수행하였다. 편광 유지 광섬유 격자는 위상 마스크를 이용하여 Bow-Tie 형 광섬유에 형성시켰는데, 편광 유지 광섬유는 두 개의 고유 편광 축을 가지므로 두 개의 브래그 peak을 가진다. 종방향 스트레인과 온도 변화에 따른 두 개의 브래그 파장 변화를 측정할 결과 각각 $1.2 \text{ pm}/\mu\text{E}$ 의 종방향 스트레인에 대한 파장 민감도와 $11.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 의 온도에 대한 파장 민감도가 관측되어, 단일 모드 광섬유 격자의 보고된 값과 거의 일치하였다. 반면에 편광 유지 광섬유 격자에 횡방향 스트레인을 가하면 두 브래그 파장사이의 간격이 변화함을 관측하였고, 두 브래그 파장 간격에 대하여는 $14.6 \text{ pm}/\text{N}$ 의 횡방향 스트레인에 대한 파장 민감도를 얻었다. 편광 유지 광섬유 격자 센서는 온도의 변화에 무관한 횡방향 스트레센스 즉, 압력 센서로 이용할 수 있음을 보였다.

I. 서 론

1978년 K. O. Hill 등^[1]은 광섬유에 Ar+ 레이저를 조사함으로써 광섬유에 격자가 형성될 수 있음을 처음 발견하였으며, 1989년 G. Meltz 등^[2]에 의하여 Ge이 첨가된 광섬유에 엑시머 레이저(KrF or ArF excimer laser)를 이용한 간섭 무늬를 광섬유 측면에 인가함으로써 영구적인 광섬유 격자를 형성시킬 수 있음을 보인 이후로 광섬유 격자에 대한 본격적인 연구가 시작되었다. 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating)란 광섬유의 코어에 자외선 영역의 엑시머 레이저를 조사하여 영구적으로 주기적인 굴절율의 변화를 준 것이며, 특정한 파장에서 높은 광 반사 특성을 보이는 광섬유 소자이다. 최대의 광 반사도를 나타내는 브래그 공명 파장은 식 (1)에 의해서 결정된다.

$$\lambda_B = 2n_c \Lambda \quad (1)$$

여기에서, λ_B 는 브래그 파장을 나타내고, n_c 는 광섬유 코어(core)의 유효 굴절율(effective index)을 나타내며 그리고 Λ 는 광섬유 코어 내부에 형성된 격자의 주기를 나타낸다.

광섬유 격자 센서는 광섬유 격자에 가해진 외부 물리량(온도, 스트레센스, 전기장, 자기장 등)에 의해 야기되는 브래그 공명 파장의 변화를 측정하여 가해진 물리량을 알아내는데 이용되는 소자이다. 물리량에 대한 브래그 파장의 변화율은 선형적이며, 광섬유 격자 센서의 반응은 브래그 파장의 변화로 나타나므로, 광경로의 변화나 산란된 빛의 양의 변화를 측정하는 기존의 광섬유 센서와는 달리 광섬유 전달 경로상에서

는 손실등에 영향을 받지 않으며, 조금씩 파장을 달리한 광섬유 격자를 이용하여 multi-points 센서로의 확장 또한 매우 쉽게 할 수 있다.

편광 유지 광섬유^[3](Polarization-Maintaining Fiber)는 외부 물리량의 섭동에 의한 편광 특성 변화를 적게하기 위해 제작된 특수 광섬유이다. 본 실험에서는 Bow-Tie형 편광 유지 광섬유에 격자를 형성시켜 센서로 사용하였으며, 사용된 광섬유의 복굴절도(birefringence)가 1.5×10^{-4} 이고, 파장 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 단일 모드이다. 편광 유지 광섬유는 굴절율이 다른 두 주축을 가지며, 굴절율이 높은 부분을 slow axis라 하고, 굴절율이 낮은 부분을 fast axis라 한다. 따라서 편광 유지 광섬유에 격자를 형성시켰을 때, 두 개의 브래그 파장 스펙트럼이 나타나며, 이것은 편광 유지 광섬유의 기본 두 축에 따라서 굴절율이 다르기 때문이다.

II. 본 론

광섬유 격자 센서의 동작 원리는 다음과 같다. 광섬유 격자는 코어에 형성된 주기적인 굴절율의 변화에 의해 광 반사 파장이 결정되며, 편광 유지 광섬유 격자에 외부 물리량을 가했을 때, 광섬유 격자는 광섬유 코어에 형성된 주기적인 굴절율 변화와 가해진 복굴절 크기 변화에 의해 광투과 스펙트럼 즉 브래그 반사 파장이 변화한다.

그림 1은 편광 유지 광섬유 격자에 의해서 형성된 두 개의 브래그 공명 파장의 스펙트럼을 나타낸 것이다.

그림 1과 같이 두 브래그 파장 간격은 0.3 nm 이며, 이와 같은 편광 유지 광섬유 격자를 이용하여 종방향 스트레센스, 온도, 그리고 횡방향 스트레센스에 대한 파장 변화율을 측정하였다.

*이 논문은 1994년 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구과제 연구비 일부 지원에 의하여 연구되었음

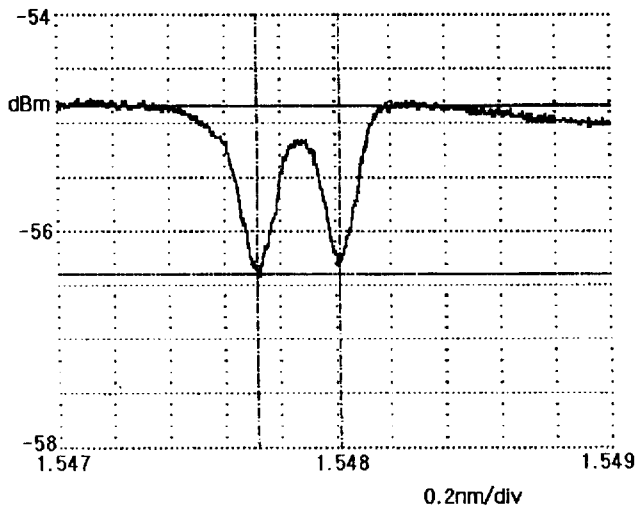


그림 1. 편광 유지 광섬유 격자 소자의 광투과 곡선

2.1. 종방향 스트레인 및 온도의 변화

광섬유 길이 방향의 종방향 스트레인과 온도에 의해 변화된 브래그 파장은 아래 식과 같이 표현할 수 있다.^[4]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta n(\epsilon', T)}{n} + \frac{\Delta L(\epsilon', T)}{L} = (1-p_e)\epsilon' + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (2)$$

여기에서, $p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$ 는 유효 광탄성 상수 (effective photoelastic coefficient)이고 p_{11} , p_{12} 는 광탄성 텐서의 성분, ν 는 Poisson's ratio, α 는 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)로서 실리카에 대해서는 0.55×10^{-6} 이고, ζ 는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)로서 Ge이 첨가된 코어에서는 8.3×10^{-6} 이며 그리고 L 는 광섬유의 격자 주기이고, ϵ' 은 스트레인이고, T 는 온도이다.

윗 식과 같이 브래그 파장의 변화는 굴절률의 변화와 격자 주기의 변화의 합이며, 이 두 변화량은 종방향 스트레인과 온도 변화의 함수이다. 가해진 물리량에 대한 브래그 파장의 변화율은 선형적이며, 그러므로 파장의 변화량을 정밀히 측정할 수 있을 경우 가해진 물리량에 대한 정보를 역으로 알아낼 수 있다.

2.2. 횡방향 스트레스

편광 유지 광섬유에 횡방향으로 외력이 작용할 때, 편광 유지 광섬유의 복굴절도는 고유 복굴절도와 외력에 의해서 형성된 복굴절도의 합으로 정의되어진다. 편광 유지 광섬유의 고유 복굴절도(intrinsic birefringence) B_{in} ^[5]는 식 (3)에 의해서 표현된다.

$$B_{in} = \beta_s - \beta_f = \frac{2\pi}{L_B} \quad (3)$$

여기에서, β_s 와 β_f 는 편광 유지 광섬유 코어에서 slow axis와 fast axis의 유효 전파 상수를 나타내고, L_B 는 이 두 축들 사이의 beat length이다.

그림 2에서 보여진 것처럼 slow axis로 부터 각 θ 에서 외력

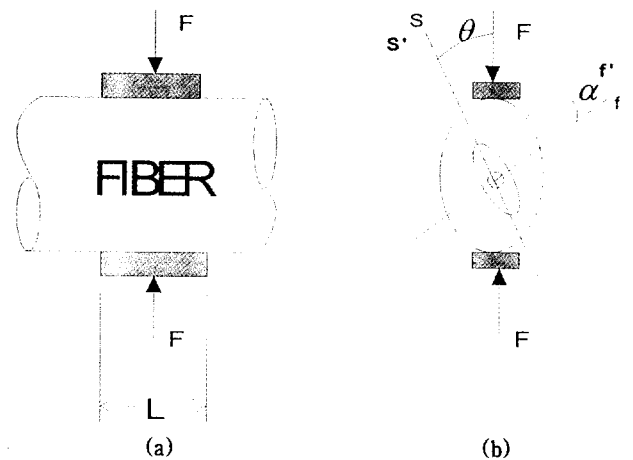


그림 2. 편광 유지 광섬유의 주축 s, f임의의 각 θ 방향으로 가해지는 횡축 스트레스에 의해서 형성되는 새로운 주축 s', f'

은 가해진 힘에 의해 복굴절 B_{ext} ^[5]가 유도된다.

$$B_{ext} = aCfn^3k_0/2d \quad (4)$$

여기에서, a는 상수로서 등근 광섬유에 대해서는 약 1.58이고, C는 탄성 광학 계수(elasto-optical coefficient)로서 실리카에 대해서는 $3.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{N}$ 이고, f는 광섬유의 단위 길이당 가해진 힘이고, k_0 는 진공에서 전파 상수이고, n은 광섬유 코어의 유효 굴절율이며, d는 광섬유의 외경을 나타낸다.

스트레스를 받는 부분에서 새로운 복굴절도 주축은 섭동을 받지않은 축 방향과 각 α 를 이룬다면 α 는 다음과 같이 주어진다.^[6]

$$\tan 2\alpha = \frac{B_{ext} \sin 2\theta}{B_{in} - B_{ext} \cos 2\theta} \quad (5)$$

외력이 광섬유에 가해질 때, 결과로 생긴 복굴절도의 총 크기 B_T ^[5]는 아래 식과 같다.

$$B_T = (B_{in}^2 + B_{ext}^2 - 2B_{in} B_{ext} \cos 2\theta)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

식 (6)은 외력에 의한 복굴절도 B_{ext} 와 힘이 가해지는 방향과 광섬유의 두 주축들 중 하나와 이루는 각 θ 를 변수로 갖는다. 이 두 변수에 의해서 총 복굴절도 B_T 가 변하고, B_T 의 변화는 광섬유내에 두 축사이에 굴절률 차에 변화를 준다. 식 (1)과 같이 굴절률의 변화는 브래그 파장의 변화를 야기하므로, 이에 의해서 두 파장사이에서 간격이 변화한다.

III. 실험

3.1. 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 편광 유지 광섬유는 Ge의 농도가 3 mol% 이므로 UV(ultra-violet) 빛에 대한 광감성(photosensitivity)이 낮다. 따라서 광감도를 증가시키기 위하여 편광 유지 광섬유

를 100°C, 압력 120 kgf/cm²의 수소 분위기에서 처리한 후^[7], KrF 엑시머 레이저와 위상 마스크^[8]를 사용하여 광섬유 격자를 제작하였다. 에너지 400 mJ/pulse, 2 Hz의 엑시머 레이저 펄스를 3분 동안 편광 유지 광섬유에 조사하였다. 광섬유 내부의 수소 분자에 의한 브래그 파장의 변화를 막기 위해 광섬유 격자를 열선 유리관에 삽입하여 150°C에서 150분 동안 열처리(annealing)를 하였다. 그림 3에서는 열처리하는 동안 시간에 따른 파장 변이를 나타내었다. 1548.6 nm에서 파장이 일정하게 유지됨을 관측하였다. 이렇게 제작된 광섬유 격자를 이용하여 종방향 스트레인, 횡방향 스트레스, 온도에 대해서 파장 변이를 측정하였다. 그림 4와 같이 광폭 광원으로 LED를 사용하였고, 파장 검출기로 Optical Spectrum Analyzer (OSA)를 사용하였다.

종방향 스트레인 측정을 위해서, 광섬유 격자의 양 끝단에 마이크로 스테이지를 놓고, 그 위에 광섬유를 고정시켰다. 그리고 마이크로 스테이지의 한 쪽을 고정시키고, 다른 쪽을 움

직이면서 광섬유를 당겨 일정한 종방향 스트레인을 가함으로써 파장 변이를 측정하였다. 온도 측정을 위해서, 열선으로 감겨진 길이 30 cm, 직경 1 cm의 석영 유리관에 광섬유 격자를 넣고, 온도를 변화시키면서 파장 변이를 측정하였다. 이때 길이 4 mm의 광섬유 격자에서의 온도의 균일도는 0.2°C 이내로 유지하였다.

횡방향 스트레스에 대한 측정을 위해서, 광섬유 격자에 가해진 힘이 광섬유에 수직하게 작용하도록 하기 위해 그림 4와 같은 장치를 하였다. 광섬유를 누르는 판은 아크릴을 사용하였다. 광섬유에 힘이 수직하게 작용하도록 하기 위해, test fiber와 dummy fiber를 평행하게 놓았다. 그 위에 아크릴 판을 놓고, 강철 핀 두 개를 평행하게 놓았다. 강철 봉에 추걸이를 걸고, 강철 봉으로 강철 핀을 눌렀다. 그리고 추걸이에 추를 올리면서, 광섬유에 스트레스를 가했다.^[9,10] 이때 test fiber에 가해진 stress는 전체에 가해진 힘의 절반이다.

3.2. 실험 결과

3.2.1. 종방향 스트레인과 온도 변화에 대한 파장 변이 측정

그림 5와 그림 6에서 종방향 스트레인과 온도에 대한 파장 변이의 그래프를 나타 내며, 광섬유 격자에 가해진 종방향 스트레인과 온도 변화에 대한 파장 변이는 두 개의 브래그 파장이 같은 기울기로 변화됨을 보인다. 이것은 두 외부 물리량이 동등하게 두 축에 대해서 가해졌기 때문이며, 그래서 식 (2)에서와 같이 브래그 파장 변화량이 두 축에 대해서 동등하게 일어난 것이다.

종방향 스트레인 및 온도에 대한 파장 민감도는 기존의 단일 모드 광섬유 격자 센서로 측정된 값과 거의 같음을 보였다.^[11,12]

3.2.2. 횡축 방향 스트레스에 대한 파장 변이 측정

그림 7과 같이 광섬유 길이 방향에 수직으로 힘을 가했을 때, 가해진 힘에 대해 두 peak 사이의 거리 변화를 측정하였다. 가해진 힘에 비례해서 두 파장 사이의 간격이 벌어짐을 알 수 있었으며, 또한 그림 6의 온도 변화와 비교해 볼 때 온

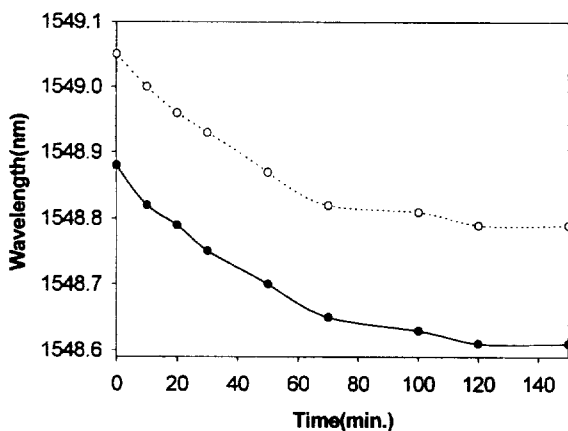


그림 3. 열처리 시간에 따른 브래그 파장의 변화. ○은 slow 축 방향의 편광모드, ●은 fast 축 방향의 편광모드를 나타낸다.

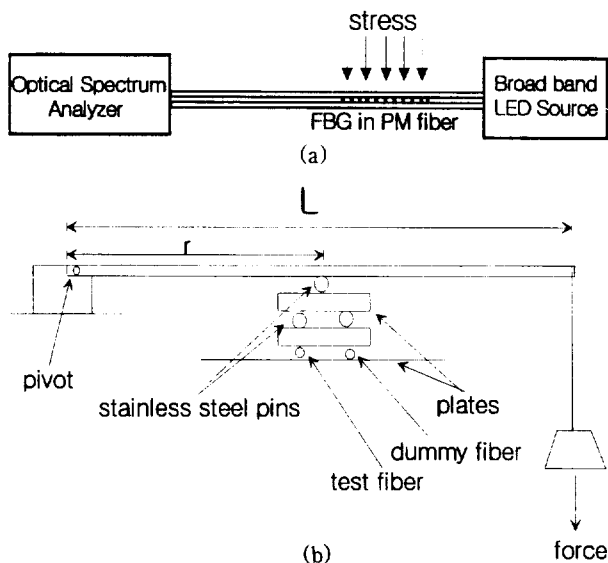


그림 4. 가해진 스트레스에 대한 브래그 파장 변이 실험 장치

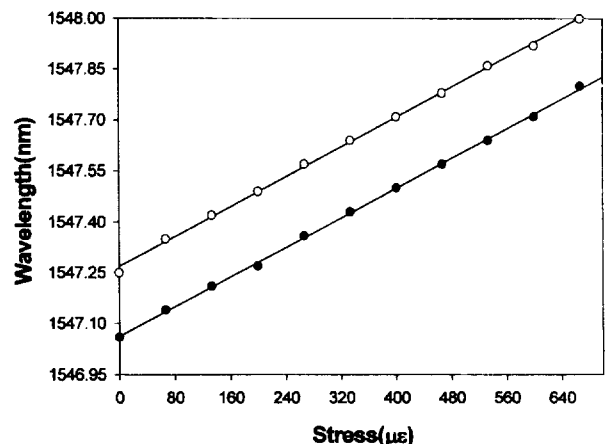


그림 5. 광섬유 길이 방향의 종방향 스트레인에 대한 광섬유 격자 소자의 브래그 파장 변화. ○은 slow 축 방향의 편광모드, ●은 fast 축 방향의 편광 모드를 나타낸다(종방향 스트레인의 파장 민감도는 1.2 pm/με).

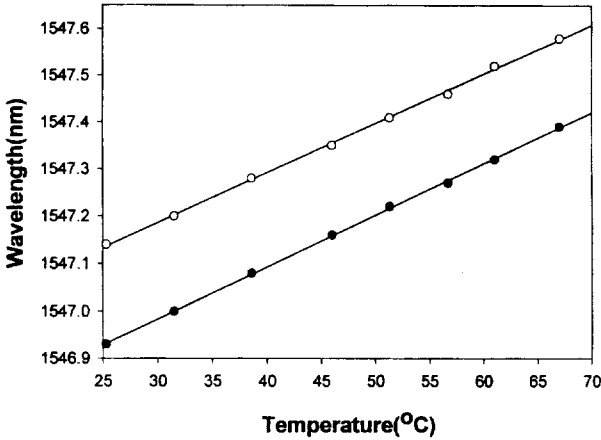


그림 6. 온도 변화에 대한 광섬유 격자 소자의 브래그 파장 변화. ○은 slow 축 방향의 편광모드, ●은 fast 축 방향의 편광모드를 나타낸다(온도에 대한 파장 민감도는 11.4 pm/°C).

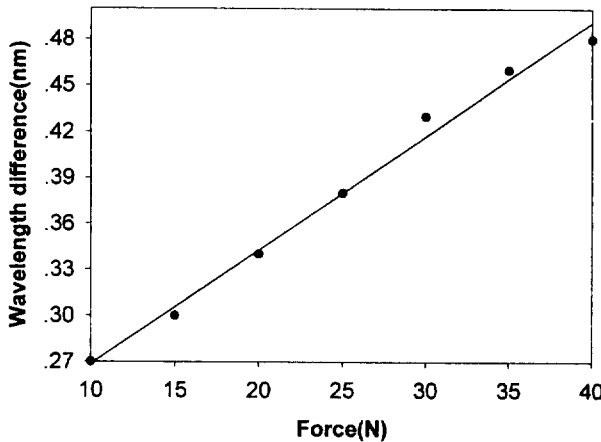


그림 7. 광섬유의 길이 방향에 수직인 방향으로 가해진 힘에 대한 두 브래그 파장 사이의 거리 변화(횡방향 스트레스에 대한 파장 민감도는 14.6 pm/N)

도에 대해서는 두 파장 간격이 변하지 않지만, 횡방향 스트레스에 대해서는 두 파장 간격이 변화됨을 알 수 있다. 그러므로 편광유지 광섬유는 횡방향 스트레스에 대해서는 온도와 무관하게 측정할 수 있는 양임을 알 수 있다.

횡방향 스트레스에 대한 파장 민감도는 14.6 pm/N이다. 횡방향 스트레스에 대한 파장 민감도는 가해진 스트레스(전체 힘의 1/2)에 대해서 두 브래그 파장사이의 간격의 변이를 말한다. 위의 횡방향 스트레스에 대한 양은 편광 유지 광섬유 축에 대해서 임의의 각 θ 로 힘을 가했을 때의 양이다. 본 실험에서는 편광유지 광섬유의 주축에 대한 스트레스의 방향인 θ 에 대한 정량적인 측정이 미진하여 미지의 각 θ 에 대한 실험 결과만을 소개하였다. 측정된 파장 민감도는 θ 에 의존하는 것으로 관측되었으나 체계적인 실험과 이론치의 분석은 현재 수행중에 있다.

4. 결 론

광섬유 격자는 코어에 형성된 주기적인 굴절율의 변화와 굴절율의 크기의 변화에 의해 광투과 파장과 광 반사도가 결정된다. 이 광섬유 격자에 외부 물리량 즉, 종방향 스트레인과 온도 그리고 횡방향 스트레스 등을 가하여 브래그 파장의 변화를 관측하였다. 본 연구에서는 Ge 농도가 3 mol%인 편광유지 광섬유를 수소처리한 후 위상 마스크를 이용해 광섬유 격자를 형성시켜 사용하였다. 편광 유지 광섬유에 격자를 새겼을 때, 두 개의 브래그 파장이 관측되었으며, 이와 같은 광투과 스펙트럼은 편광 유지 광섬유의 기본 두 축에 따라서 굴절율이 다르기 때문이었다. 종방향 스트레인과 온도 변화에 대해서 편광 유지 광섬유 격자 소자는 일반 광섬유 격자 센서와 같이 두개의 파장이 동시에 선형적으로 변이됨을 볼 수 있다. 종방향 스트레인의 파장 민감도는 1.2 pm/ μ e이고, 온도에 대한 파장 민감도는 11.4 pm/°C이었다. 광섬유에 횡방향 스트레스를 가한 경우에는 두 파장사이의 거리가 변이됨을 보였으며, 횡방향 스트레스에 대한 파장 민감도는 14.6 pm/N이었다. 편광 유지 광섬유 격자 센서는 종방향 스트레인과 온도뿐만 아니라, 횡방향 스트레스에 대해서도 그 파장 변이를 측정할 수 있으므로, 기존의 광섬유 격자 센서의 특성에 광섬유에 가해지는 압력을 측정할 수 있는 장점이 추가로 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, Appl. Phys. Lett. **32**, 647 (1978).
- [2] G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, Opt. Lett., **14**, 823 (1989).
- [3] Juichi Noda, Katsunari Okamoto, Yutaca Sasaki, J. Lightwave Technol. **LT-4**, 1071 (1986).
- [4] G. B. Hocker, Appl. Opt., **18**, 1445 (1979).
- [5] S. L. Carrara, B. Y. Kim and H. J. Shaw, Opt. Lett. **11**, 470 (1986).
- [6] R. Ulrich and A. Simon, Appl. Opt. **19**, 2241 (1979).
- [7] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi and W. A. Reed, Electron. Lett. **29**, 1191 (1993).
- [8] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert, Appl. Phys. Lett. **62**, 1035 (1993).
- [9] R. B. Wagreich, W. A. Atia, H. Singh and J. S. Sirkis, Electron. Lett. **32**, 1223 (1996).
- [10] H. K. Kim, S. K. Kim, H. G. Park and B. Y. Kim, Opt. Lett. **18**, 317 (1993).
- [11] M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie and J. P. Dakin, Electron. Lett. **30**, 1085 (1994).
- [12] S. W. James, M. L. Dockney and R. P. Tatam, Electron. Lett. **32**, 1133 (1996).

Fiber Bragg grating sensor using polarization-maintaining fiber

Cheol Jin Kim, Tae Sang Park, Sang Bae Lee and Sang Sam Choi

Div. of Electronics & Informations Technology,

Korea Institute of Science and Technology, Cheongryang 130-650, Seoul, Korea

Hae yang Chung

Dept. of Physics and Institute of Laser Engineering,

Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

(Received : March 31, 1997)

A novel fiber optic sensor is demonstrated using a FBG in PM(Polarization-Maintaining) fiber. Gratings have been written in a Bow-Tie type fiber using the phase mask. The operation of the sensor simply involves monitoring back-reflected Bragg wavelengths from the grating. Since PM fiber has two principal semi-axes with two indices of refraction, two Bragg wavelengths were observed. We have observed the position of Bragg wavelengths for PM FBG shifted simultaneously by either applying the longitudinal strain or temperature change. The wavelength sensitivity of 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ about a longitudinal strain and the wavelength sensitivity of 11.4 pm/ $^{\circ}\text{C}$ about a temperature have been experimentally achieved. The wavelength sensitivity of both longitudinal strain and temperature are approximately same with the reported values for the single mode FBG. On the other hand, the change of separation between Bragg wavelengths was observed by the applying transverse stress. We observed that the separation between two Bragg wavelengths is proportional to the applied transverse stress. The wavelength sensitivity of 14.6 pm/N about a transverse stress has been achieved. We have demonstrated PM FBG sensors can measure the transverse stress independently from the effects of temperature.