

폴리머 장주기 패턴을 이용한 표면 식각된 격자 구조 기반의 장주기 광섬유 격자

박상오 · 권오장 · 한영근[†]

한양대학교 물리학과

Ⓞ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 산 17

(2010년 9월 28일 받음, 2010년 11월 30일 수정본 받음, 2011년 1월 5일 게재 확정)

본 연구에서는 PR 폴리머 장주기 패턴을 이용하여 표면 식각된 격자 구조 기반 장주기 광섬유 격자 제조 방법을 제안하고 외부 장력 및 비틀림, 그리고 외부 굴절률에 대한 민감도를 측정하였다. 외부 장력을 인가함에 따라 특정파장에서 광결합 계수 변화에 의한 공진파장이 형성되고 투과도가 감소하게 된다. 손실이 생기게 되고 민감도는 -0.033 dB/με로 측정되었다. 비틀림과 외부 굴절률에 변화에 대해서도 표면 식각된 격자 구조 기반 장주기 광섬유 격자의 투과 특성이 변하며 민감도는 각각 -1.30 nm·m/rad, -31.33 nm/RIU로 측정되었다.

Long-Period Fiber Gratings Based on Periodically Surface-Etched Structure Imprinted by Using a Photoresist Polymer

Sang-oh Park, Oh-Jang Kwon, and Young-Geun Han[†]

Department of Physics, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seoungdong-gu, Seoul 133-791, Korea

(Received September 28, 2010; Revised manuscript November 30, 2010; Accepted January 5, 2011)

A new fabrication technique of long-period fiber gratings with periodically surface-etched structures is proposed. Transmission characteristics of the periodically surface-etched long-period fiber gratings are improved by changing strain because of variation of coupling strength between the core and the cladding modes. The sensitivities of the periodically surface-etched long-period fiber gratings to strain, torsion, and ambient refractive index were measured. The strain and the torsion sensitivities were measured to be -0.033 dB/με and -1.30 nm·m/rad, respectively. The ambient index sensitivity was measured to be -31.33 nm/RIU from a range from 1.33 to 1.42.

Keywords: Long-period fiber grating, Surface-etched structure, Strain sensor, Tunable filter

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2370) Fiber optics sensors; (160.3900) Metals; (050.2770) Gratings

I. 서 론

장주기 광섬유 격자는 외부 환경 변화에 대한 높은 민감성, 낮은 접속 손실, 외부 전자기장에 영향을 받지 않는 등 많은 장점을 가지고 있으므로 광통신 및 광섬유 센서 분야에 활용하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다^[1-8]. 기존에는 광섬유의 코어에 게르마늄을 첨가하여 광민감성 광섬유를 제작하고 이를 자외선에 주기적으로 노출하여 굴절률 변화를 유도하는 방식으로 장주기 광섬유 격자를 제조하였다. 하지만 광민감성 기반 장주기 광섬유 격자 제조 기술은 특수 광섬유에 제한적으로 활용할 수 있으므로 광자 결정 광섬유 및 희

토류 첨가 광섬유 등과 같은 게르마늄이 없는 특수 광섬유에는 격자를 제조할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 클래딩 부분을 주기적으로 식각한 장주기 광섬유 격자가 연구되었다^[3-6]. 주기적인 광섬유 식각을 유도하기 위해 광섬유 표면을 주기적으로 금속을 증착하는 방법들이 제시되었으나, 금속이 유전체의 표면에 흡착이 쉽지가 않아 다양한 금속 물질들을 합금하고 증착을 해야 하며, 금속 코팅을 위해서는 고가의 코팅 또는 증착 장비가 필수적이다. 또한 광섬유 표면에 대칭적으로 증착을 하기 위해서는 특수한 장비가 필요로 하는 단점을 가지고 있다^[3-6]. 본 논문에서는 장주기 광섬유 격자를 효과적으로 제조하기 위

[†]E-mail: yghan@hanyang.ac.kr

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

한 새로운 제조 방법에 대해서 제안하고 실험적으로 구현하였다. 제안된 방법은 폴리머, 자외선 노출 및 식각 기술을 기반으로 간단하게 광섬유 표면에 대칭적으로 주기적인 격자 구조를 유도할 수 있으므로 대량 생산이 가능한 효과적인 장주기 격자 제조 기술이다. 제조된 광섬유 장주기 격자는 주기적인 표면 식각된 격자 구조들이 외부와 직접적으로 접하고 있기 때문에 외부 환경 변화에 아주 민감하게 반응할 수 있으므로, 이러한 결과를 포토닉 밴드 갭 광섬유나 히트류침가 광섬유 등의 특수 광섬유에 적용을 한다면 광섬유 센서와 소자 분야에 활용이 크게 기대된다. 따라서 본 연구에서는 표면 식각된 격자 구조형 장주기 광섬유 격자의 외부 장력 및 비틀림, 그리고 외부 굴절률에 대한 민감도를 측정하였다.

II. 제안된 격자의 원리

일반적으로 장주기 광섬유 격자는 코어 모드와 클래딩 모드 간의 모드 결합에 의해 공진 파장이 나타나는 소자이다. 코어 모드와 클래딩 모드 간의 유효 굴절률 차이가 작기 때문에 모드 결합을 유도하기 위해서는 수 백 μm 크기의 주기를 갖는 굴절률 변화가 필수적이다. 주기적인 굴절률 변화는 광섬유 코어 부분에 유도된다. 그림 1은 주기적 표면 식각된 격자 구조 장주기 광섬유 격자의 구조를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 기본적으로 식각된 부분(r_c)과 식각이 되지 않은 부분(r_u)의 굴절률 차이에 의한 코어 모드와 클래딩 모드의 결합을 유도하는 구조로 되어 있다. 따라서 일반적인 장주기 광섬유 격자에서는 코어 부분에 굴절률 변화가 유도되는 반면에 표면 식각된 격자 구조 장주기 광섬유 격자에서는 클래딩 부분에 굴절률 변화가 인가되므로 공진 파장이 형성되기 위한 위상 정합 조건이 다르게 유도된다^[4-6]. 표면 식각된 격자 구조 장주기 광섬유 격자에서 공진파장(λ)은 다음 식으로 표현된다^[4-6].

$$\lambda = \frac{\Lambda (n_{co,eff} - n_{cl,eff})}{1 + (\kappa_{cl} - \kappa_{co}) \Lambda 2\pi} \quad (1)$$

여기서 $n_{co,eff}$ 는 코어모드의 유효굴절률이고, $n_{cl,eff}$ 은 평균된 클래딩모드의 유효굴절률, Λ 는 장주기 격자의 주기이다. κ 는 코어모드와 클래딩 모드간의 광결합 계수 (optical coupling

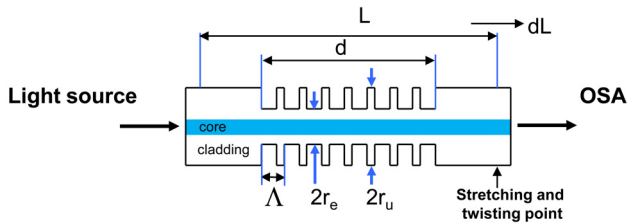


FIG. 1. Structure of the proposed periodically surface-etched long-period fiber gratings.

coefficient)를 나타내며 다음과 같이 주어진다^[6].

$$\bar{\kappa}_r = \frac{w\epsilon_0}{4} \int 2n_e^{(0)} \Delta n_{strain}(r) \mathbf{e}_r^*(r) \cdot \mathbf{e}_r(r) dA \quad (r=co \text{ 또는 } cl) \quad (2)$$

여기서 $n_e^{(0)}$ 는 식각된 구간의 변형전 굴절률을 나타내고 Δn_{strain} 은 외부 장력에 의한 광탄성효과(photoelastic effect)에 따른 굴절률 변화율이고, \mathbf{e}_r 은 평균된 코어와 클래딩 모드를 나타낸다. 따라서 코어 및 클래딩 모드들의 광결합 계수는 광탄성 효과에 의해 결정된다. 제작된 장주기 격자의 투과도(T)는 다음 식으로 표현된다^[6].

$$T \equiv \cos^2(\bar{\kappa}d) = \cos^2[\alpha(\gamma^2 - 1)sd] \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{r_c}{r_u}$$

여기서 d는 장주기 격자 구간의 총 길이를 나타내고, a는 제작된 광섬유격자의 광탄성계수(photoelastic constant), s는 가해진 외부 장력의 크기이다. γ 는 식각된 부분(r_c)과 식각이 되지 않은 부분(r_u)의 반지름 비율을 나타낸다. γ 의 크기가 커질수록 투과도의 크기도 감소하게 된다. 즉 표면 식각된 격자 구조 장주기 광섬유 격자에 외부 장력을 인가하면 광탄성 효과에 의해서 식각된 부분이 식각되지 않은 부분보다 많이 늘어나므로 식각된 부분의 반지름이 감소가 훨씬 크게 나타나므로 반지름 비율 γ 가 증가하므로 투과도가 감소한다. 따라서 제작된 표면 식각된 격자 구조 장주기 광섬유 격자에 외부 장력(s)을 인가하여 실시간으로 장주기 격자 공진 파장의 투과도를 조절할 수 있다.

III. 격자 제작 및 특성 측정

표면 식각된 격자 구조 장주기 광섬유 격자는 분산천이광섬유(dispersion shifted fiber, DSF) 표면에 금속 마스크를 이용하여 특정 주기의 대칭적 PR 폴리머를 코팅하고 HF를 이용하여 습식 식각 기술로 광섬유 표면에 주기적인 변화를 유도하였다. 그림 2(a)와 2(b)는 표면 식각된 격자 구조 장주기 광섬유 격자의 제작 방법 및 과 과정별 개략도를 나타낸다. HF으로부터 광섬유를 보호 할 수 있는 폴리머층을 제작하기 위하여 스펀 코팅기를 이용하여 기판에 PR 폴리머(PMER-3000PM)를 150 μm 두께로 1차 코팅을 하고, 그 위에 분산 천이 광섬유를 올려 놓고 다시 150 μm 두께로 폴리머를 2차 코팅하였다. 제안된 방식은 1차 폴리머 코팅후 2차 폴리머 코팅시 추가적인 마스크의 정렬과정이 필요 없어 제작과정을 효율적으로 할 수 있다. PR 폴리머 이중 구조에 의해서 실린더 형태의 광섬유 전체를 폴리머로 대칭적으로 코팅할 수 있었으며 PR 폴리머 총두께는 300 μm 이다. PR 폴리머에 포함되어 있는 용제 (solvent)를 제거하기 위해서 120 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 60분 동안 soft baking 과정을 거쳤다. 그리고

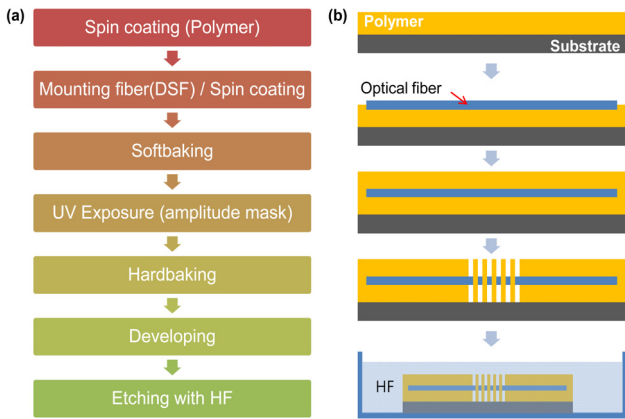


FIG. 2. (a) Fabrication procedure of the periodically surface-etched long-period fiber gratings and (b) scheme for each procedures.

PR 폴리머가 대칭적으로 코팅된 분산 천이 광섬유를 주기가 450 μm인 금속 마스크를 통하여 UV-lamp에 일정시간 동안 노출시켜 PR 폴리머가 UV-lamp에 의해 주기적으로 경화되고 현상액에 30분 동안 담그면 UV-lamp에 의해 경화된 PR 폴리머는 제거된다. 그리고 100°C 온도에서 60분 동안 hard baking 과정을 통해서 PR 폴리머를 안정화시켰다. 현상된 패턴을 HF에 일정시간 동안 담가 놓으면, PR 폴리머가 코팅되지 않은 부분인 실리카 부분이 시간이 증가됨에 따라 HF에 의해 산화되면서 식각된다.

그림 3은 본 연구에서 개발된 장주기 격자 제조 방법에 의해 제작된 분산천이광섬유 기반의 표면 식각된 격자 구조 광섬유 장주기 격자의 (a)광학 현미경 사진 (a)과 개략도 (b)이다. 제작된 장주기 격자의 주기는 450 μm이고, 식각된 부분의 지름은 28 μm로 측정되었다. 그림 4(a)는 백색광원(white light source)과 광스펙트럼 분석기(Optical spectrum analyzer: OSA)를 이용하여 표면 식각된 격자 구조 기반의 장주기 광섬유 격자의 투과 스펙트럼을 측정한 결과를 나타낸다. 그림 2(b)는 외부 장력 변화에 따른 투과도 변화를 나타낸다. 외부 장력이 없을 때는 공진파장이 발생하지 않았으며 외부 장력이 가해졌을 때 공진파장에서 투과도가 감소하였다. 즉 분산천이광섬유의 코어 부분에만 광신호가 존재하므로 클래딩 부분을 주기적으로 식각하더라도 코어 모드의 광결합이 일어나지 않는다. 하지만 외부에 장력을 인가하면 식각된 부분과 식각되지 않은 부분 사이에 장력에 의한 광탄성효과 차이가 발생하여 코어 부분에 굴절률 변화를 일으키므로 코어 모드와 클래딩 모드의 광결합이 유도된다. 그런데 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 장력에 의한 코어 및 클래딩 모드의 광결합 계수 변화는 동일하며 외부 장력에 의한 굴절률 변화는 아주 작으며 장주기 격자 주기의 변화가 3% 미만이므로 변화가 아주 작아서 공진 파장의 변화에 영향을 주지 못한다. 따라서 외부 장력에 따라 투과도의 변화는 발생하더라도 공진 파장의 변화는 일어나지 않는다. 그림 2(b)에서 보는 것과 같은 공진 효과가 발생하며 외부 장력이 증가할수록 광결합

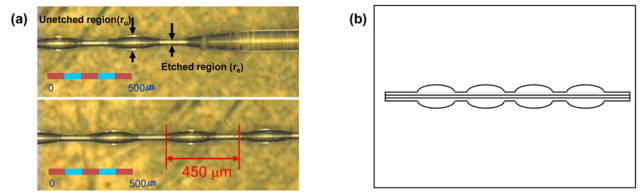


FIG. 3. (a) Microscopic image and (b) scheme of the periodically surface-etched long-period fiber gratings.

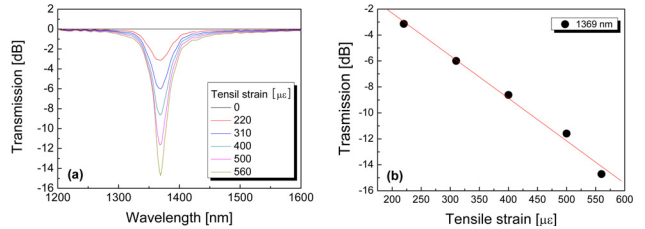


FIG. 4. (a) Transmission spectra and (b) transmission peak depth of the periodically surface-etched long-period fiber gratings as the applied strain increases.

이 증가하고 투과도가 감소한다. 일반적으로 장주기 광섬유 격자에서 투과도는 $\cos^2 kL$ 에 비례하여 감소하므로 외부 장력에 의해서 투과도가 감소하다가 증가하는 경향을 보인다. 외부장력 560 με에서 14.7 dB의 투과도가 측정되었고 FWHM (Full width at half maximum)는 0.13 nm로 측정되었다. 그림 4(b)에서 보는 것과 같이 외부장력에 대한 투과도가 선형적으로 감소하게 되며 외부장력에 대한 민감도는 -0.033 dB/με로 측정되었다.

그림 5(a)는 외부 비틀림 변화에 대한 표면 식각된 격자 구조 기반의 장주기 광섬유 격자의 스펙트럼 변화를 나타낸다. 외부 장력에 의한 변화와 마찬가지로 외부 비틀림이 증가함에 따라 광탄성효과에 의해서 코어 부분에 굴절률 변화를 유도하고 코어 모드와 클래딩 모드 사이의 광결합으로 인하여 공진효과가 나타난다. 그러나 외부 장력 변화에서와는 달리 비틀림 비율이 증가할수록 공진파장이 단파장으로 이동하며 투과도가 감소하였다. 최대투과도인 14.7 dB 이상에서는 비틀림이 증가함에도 투과도가 다시 증가하는 경향을 보여준다. 이것은 식각된 부분과 식각이 되지 않은 부분의 비틀림에 의한 변화가 다르게 유도되며 클래딩 모드의 광결합 계수의 변화가 크게 유도되므로 식 (1) 및 (2)에서 알 수 있듯이 공진 파장이 단파장으로 이동한다. 그리고 식 (3)에서 알 수 있듯이 비틀림에 의해 식각된 부분의 반지름 변화가 크게 발생하므로 비틀림이 증가할수록 투과도가 감소하게 된다. 그림 5(b)는 외부 비틀림이 증가함에 따라 공진파장이 단파장으로 선형적으로 감소하게 되며 외부 비틀림에 대한 민감도는 -1.30 nm·m/rad로 측정되었다.

그림 6(a)는 굴절률 정합 용액을 이용하여 외부 굴절률을 1.33부터 1.46까지 변화시키며 측정한 투과 스펙트럼 변화를 나타낸다. 외부 굴절률이 증가할수록 표면 식각된 격자 구조

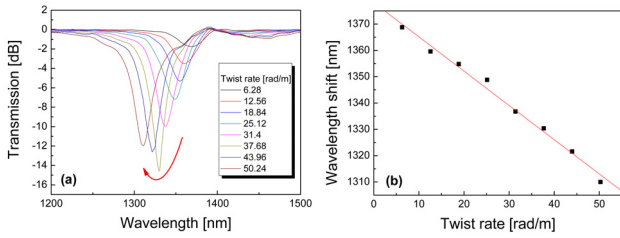


FIG. 5. (a) Transmission spectra and (b) resonant wavelength shifts of the periodically surface-etched long-period fiber gratings as the applied twist rate increases.

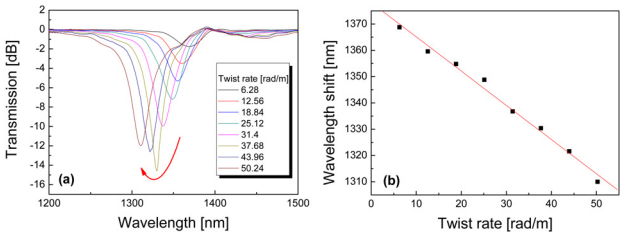


FIG. 6. (a) Transmission spectra and (b) resonant wavelength shifts of the periodically surface-etched long-period fiber gratings as the ambient index increases.

기반 장주기 광섬유 격자의 공진 파장은 단파장으로 이동하였다. 외부 굴절률 변화에 대한 공진파장 이동 변화도 비틀림에 의한 효과와 마찬가지로 클래딩 모드의 광결합 계수의 외부 굴절률 변화에 대한 의존도가 높기 때문에 공진 파장이 단파장으로 이동하였다. 하지만 외부 굴절률 변화에 의한 광섬유의 반지를 변화는 없기 때문에 투과도 변화는 나타나지 않는다. 그림 6(b)에 보는 바와 같이 외부 굴절률에 대한 공진 파장의 민감도는 -31.33 nm/RIU (refractive index unit)으로 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 유전체에 부착성이 좋은 PR 폴리머를 이용하여 추가적인 장비 없이 폴리머 이중 코팅 방법으로 실린더 형태를 가지는 광섬유에 대칭적으로 폴리머 코팅을 유도하고 금속 마스크 및 HF 식각을 이용하여 표면 식각된 격자 구조 기반 장주기 광섬유 격자를 제조하였다. 본 연구에서 개발된 새로운 장주기 광섬유 격자 제조 기술은 기존의 반도체 공정에 많이 쓰이는 photolithography 공정을 통해 표면 식각된 격자 구조 기반 장주기 광섬유 격자를 제작하였고 습식 식각 방식을 이용하였다. 기판의 크기에 따라 광섬유 배열을 최적화 하면 한 번의 제작 과정에 균일한 조건의 격자

를 다량으로 제작 할 수 있으므로 대량 생산에 적합하다. 외부 장력이 증가함에 따라 공진파장의 변화 없이 투과도가 증가하였고 투과도의 외부 장력 변화에 대한 민감도는 $-0.033 \text{ dB}/\mu\epsilon$ 로 측정되었다. 비틀림과 외부 굴절률에 대한 민감도는 각각 $-1.30 \text{ nm}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $-31.33 \text{ nm}/\text{RIU}$ 로 측정되었다. 또한 스트레인과 외부장력을 조절하여 공진 파장과 투과도를 동시에 변화시킬 수 있다. 이와 같은 결과는 광민감성이 없는 포토닉 크리스탈 광섬유 (Photonic crystal fiber, PCF), 히토류 금속 첨가 광섬유 등의 Ge이 없는 광섬유에 격자 제작이 가능하다. 이밖에 외부 변화에 따른 투과도 변화를 측정하여 가변할 수 있는 광소자 및 광센서로서 활용 등 넓은 범위의 응용이 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0016146).

References

1. V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.* **21**, 692-694 (1996).
2. M. S. Kwon, "Influence of the parameters of a heater array inducing a thermo-optic long-period grating on its power consumption," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **19**, 315-319 (2008).
3. C. Y. Lin and L. A. Wang, "Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure," *Electron. Lett.* **21**, 1872-1873 (1999).
4. C. Y. Lin and L. A. Wang, "A wavelength- and loss-tunable band-rejection filter based on corrugated long-period fiber grating," *Photon. Tech.* **4**, 332-334 (2001).
5. T. Erdogan, "Cladding-mode resonances in short- and long period fiber grating filters," *J. Opt. Soc. Am. A* **8**, 1760-1773 (1997).
6. C. Y. Lin and L. A. Wang, "Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors," *IEEE J. Lightwave Technol.* **8**, 1159-1168 (2001).
7. N. Lee, J. Song, and J. Park, "Mechanically induced long period fiber grating array device and sensor application," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **18**, 142-148 (2007).
8. H. J. Patrick, A. D. Kersey, and F. Bucholtz, "Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction," *IEEE J. Lightwave Technol.* **16**, 1606-1612 (1998).