

직렬 연결 위상 천이 장주기 격자의 특성과 초기 커플링 세기 효과에 관한 연구

김민성[†]

동명정보대학교 정보통신공학과
☎ 608-711 부산시 남구 용당동 535번지

한영근

한국과학기술연구원 광기술연구센터
☎ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

(2005년 11월 3일 받음, 2006년 1월 20일 수정본 받음)

위상 천이 광섬유 격자를 직렬로 연결하였을 경우 파장 투과 특성에 대해서 이론 및 실험적으로 분석하였다. π 만큼의 위상 천이가 유도된 장주기 격자의 파장 투과 특성은 직렬 연결되는 위상 천이 장주기 격자의 개수에 따라 변화하며 개수를 증가시키기에 따라 파장 투과 대역폭을 증가시킬 수 있다. 또한 π -위상 천이 장주기 격자의 파장 투과 대역폭은 격자 길이를 변화시키기에 따라 조절할 수 있으며 길이가 다른 두 개의 π -위상 천이 장주기 격자를 직렬로 연결하면 파장 투과 및 제거 대역폭을 조절할 수 있다. 그리고 장주기 격자의 반을 UV에 노출 시켰을 때, 위상 천이 장주기 격자가 형성됨을 관찰하였고, 초기 커플링 세기에 따라 격자의 형성이 달라짐과 인가되는 위상 천이 크기에 따라서 다양한 형태의 위상 천이 장주기 광섬유 격자의 투과 특성을 나타내었다.

주제어 : Long-period fiber gratings, Phase-shifted long-period fiber gratings.

I 서 론

광섬유 격자는 광통신 시스템과 센서시스템 구성에 있어서 중요한 광소자로서 활발하게 연구되고 있다. 이러한 광섬유 격자는 광섬유 내에 굴절률의 주기적인 변화를 유도하여 광 신호의 특성을 변화시키는 광소자로서 굴절률 변화의 주기의 크기에 따라 단주기 격자(Fiber Bragg grating (FBG))와 장주기 격자(Long-period fiber grating(LPFG))의 두 가지 종류로 나누어진다.^[1-2] 단주기 격자는 반대 방향으로 진행하는 코어 모드들끼리의 상호 작용에 의한 커플링에 기반을 두고 있으며 브래그(Bragg) 공진 조건을 만족하는 파장대의 광을 격자를 통과하지 못하고 반사하게 된다.^[1] 장주기 광섬유 격자는 그 작용 원리가 단주기 격자와는 달리 광섬유내의 코어 모드와 클래딩 모드의 상호 작용에 의한 커플링에 기반을 두고 있으며 코어의 굴절률 변화 주기가 수백 μm 정도로 상당히 긴 편이다. 장주기 격자의 경우 공진 조건을 만족하는 파장대의 광신호는 클래딩 모드와의 커플링으로 인해 반사되지 않고 투과 스펙트럼 상에 손실로써 나타난다. 굴절률 변화 주기가 단주기 격자에 비해 매우 길어 제조 방법 또한 간단하고, 대량 생산이 용이하며, 삽입 손실이 적고, 역방향 반사율이 작다는 장점을 가지고 있다.^[2] 이러한 특성을 이용하여 장주기 격자는 광필터, 대역 제거 필터, 광증폭기의 이득 평탄화 필터 등의 다양한 응용 분야에서 사용되고 있다.^[2-5] 최근에는 장주기 격자 내에 위상 천이 구간을 유도하여 장주기 격자의

특성을 조절할 수 있는 기술이 보고 되었다. 장주기 광섬유 격자 중앙에 위상 천이 구간을 인가하면 파장 투과 영역이 생성되고 이를 이용하여 광섬유 증폭기의 이득 특성을 평탄화할 수 있는 광섬유 필터에 응용한 연구 결과가 보고되었다.^[6] 하지만 위상 천이 변수에 따른 장주기 광섬유 격자의 파장 투과 특성에 대해서는 보고가 되지 않았으며 위상 천이 장주기 격자를 직렬 연결하였을 경우 투과 특성에 대해서는 연구가 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 위상 천이 광섬유 격자를 직렬로 연결하였을 경우 파장 투과 특성에 대해서 이론 및 실험적으로 분석하였다. Transfer matrix 방식을 이용하여 위상 천이 장주기 격자의 특성을 분석하고 이들을 직렬로 연결한 경우에 대해서 이론적으로 분석하였다. π 만큼의 위상 천이가 유도된 장주기 격자의 파장 투과 특성은 직렬 연결되는 위상 천이 장주기 격자의 개수에 따라 변화하며 개수를 증가시키기에 따라 파장 투과 대역폭을 증가시킬 수 있다. 또한 π -위상 천이 장주기 격자의 파장 투과 대역폭은 격자 길이를 변화시키기에 따라 조절할 수 있으며 길이가 다른 두 개의 π -위상 천이 장주기 격자를 직렬로 연결하면 파장 투과 및 제거 대역폭을 조절할 수 있다. 또한 장주기 광섬유 격자의 초기 커플링 세기에 따른 위상 천이 장주기 격자의 투과 특성에 대해서도 이론 및 실험적으로 분석하였다.

II 위상 천이 장주기 광섬유 격자의 특성

장주기 광섬유 격자는 코어 모드와 클래딩 모드 사이의 상

[†] E-mail: minsung@tit.ac.kr

호 작용에 의해서 코어 모드가 여러 개의 클래딩 모드로 커플링되는 현상에 기반을 두고 있다. 특히 장주기 격자에서는 격자 주기가 길어서 굴절률 차이가 작은 코어 모드와 클래딩 모드 사이에서 커플링이 유도될 수 있으며 클래딩 모드 사이의 굴절률 차이도 작기 때문에 코어 모드는 여러 가지 클래딩 모드로 커플링될 수 있다. 일반적으로 HE_{1,1} 코어 모드가 장주기 격자를 통해서 클래딩 모드인 HE_{1,m}로 커플링 된다. 여기서 *m*은 클래딩 모드 차수를 나타낸다. co-directional coupled mode 이론에 의해서 격자 길이 *L*을 가지는 장주기 격자를 통과한 코어 모드와 클래딩 모드의 크기는 다음과 같이 transfer matrix 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_{co}(L) \\ a_{cl}(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i(\frac{\Delta\beta}{2})L} & 0 \\ 0 & e^{i(\frac{\Delta\beta}{2})L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos sL + i\frac{\Delta\beta}{2s} \sin sL & i\frac{\kappa}{s} \sin sL \\ i\frac{\kappa}{s} \sin sL & \cos sL - i\frac{\Delta\beta}{2s} \sin sL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}(0) \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}(0) \end{pmatrix}$$

$$s = \left(\kappa^* \kappa + \frac{\Delta\beta^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \Delta\beta = \beta_{co} - \beta_{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda}$$

여기서 *a_{co}*과 *a_{cl}*은 각각 코어 모드와 클래딩 모드의 크기를 나타내고 *κ*는 커플링 상수, *Λ*는 격자 주기를 나타낸다. 그리고 *β_{co}*와 *β_{cl}*는 각각 코어 모드와 클래딩 모드의 전파 상수를 나타낸다. 위상천이 장주기 광섬유 격자는 그림 1에서 보는 바와 같이 장주기 격자 중앙 부분에 위상 천이 구간이 있어서 기존의 장주기 광섬유 격자와 다른 투과 특성을 나타내는 광소자로서 좁은 대역의 투과 특성을 갖는 파장 투과 필터이다. 그림 1에서와 같이 여러 개의 위상 천이 장주기 격자가 직렬로 연결된 경우를 분석하기 위해서는 transfer matrix를 직렬로 나열하고 중앙에 위상 천이 matrix를 배열하면 위상 천이 장주기 격자에 대해서 분석할 수 있다. 즉 여러 개의 위상 천이 장주기 격자를 직렬로 연결하였을 경우 코어 및 클래딩 모드의 크기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}_{out} = T_N \cdot \begin{pmatrix} e^{i\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\phi}{2}} \end{pmatrix} \cdot T_{N-1} \cdot \begin{pmatrix} e^{i\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\phi}{2}} \end{pmatrix} \cdots T_2 \cdot \begin{pmatrix} e^{i\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\phi}{2}} \end{pmatrix} \cdot T_1 \begin{pmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \end{pmatrix}$$

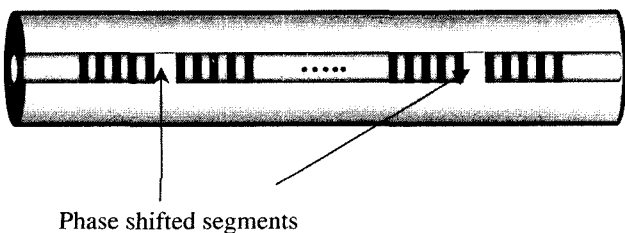


그림 1. 직렬 연결 위상 천이 장주기 광섬유 격자에 대한 개요도.

여기서 *φ*는 장주기 광섬유 격자 내에서 인가된 위상 천이 크기를 나타낸다. 위상 천이 장주기 격자를 제조하기 위해서 두 개의 길이가 다른 장주기 격자를 제조하였다. 장주기 광섬유 격자 길이는 각각 2 cm와 5 cm로 하였고 격자 주기는 동일하게 400 μm로 하였다. 위상 천이를 유도하기 위해 장주기 격자를 제조하고 amplitude mask를 제거한 후 장주기 격자가 제조된 광섬유의 중심을 UV레이저에 균일하게 노출시켜 위상 천이 장주기 격자를 제조하였다. 이때 slit를 이용하여 UV 레이저에 노출되는 광섬유의 길이를 조절하였다. 노출 길이는 약 1 mm 정도로 측정되었다.

그림 2에서는 인가된 위상 천이 크기에 따른 장주기 광섬유 격자의 투과 특성을 나타내고 있다. 여기서 격자 길이(*L*)는 2 cm, 격자 주기(*Λ*)는 400 μm로 하였다. 장주기 광섬유 격자 중앙에 각각 0, π/4, π/2, 5π/4, 3π/2 만큼의 위상 천이를 인가하면 파장 제거 대역 영역에 투과 대역이 생성되고 위상 천이 크기에 따라서 파장 투과 대역이 변하며 위상 천이가 π/2 만큼이 유도되면 main peak가 두 개의 peaks로 나타난다. 그리고 위상 천이 크기가 증가할수록 파장 투과 대

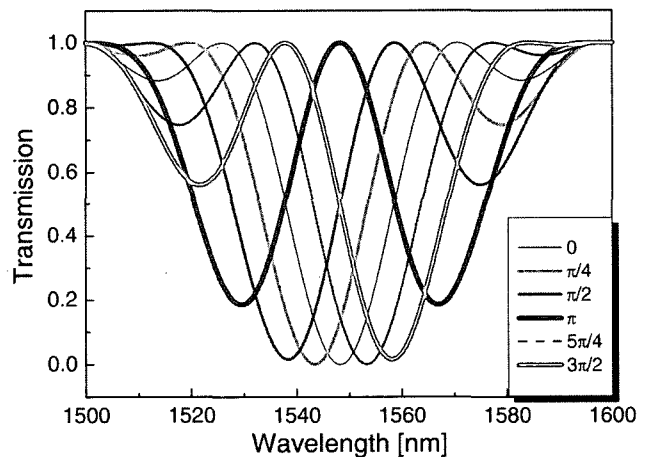


그림 2. 위상 천이 크기에 따른 장주기 광섬유 격자의 투과 특성.

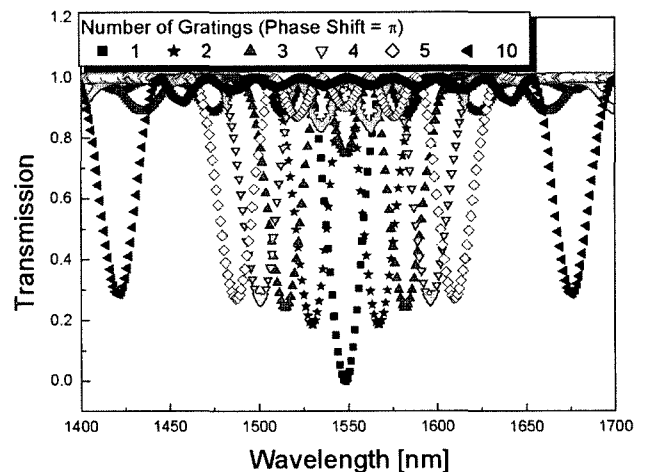


그림 3. π-위상 천이 장주기 광섬유 격자 개수에 따른 투과 특성.

역이 장파장에서 단파장으로 이동하게 된다. 그림 3에서는 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자 개수를 증가시켜 직렬로 연결하였을 경우 투과 특성을 나타낸다. 격자 개수가 증가할수록 파장 투과 대역폭이 증가함을 알 수 있다. 즉 위상천이 장주기 격자를 10개를 연결한 경우 파장 투과 대역폭이 10 배 이상 증가하였다. 따라서 여러 개의 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자를 직렬로 연결하면 넓은 투과 대역폭을 갖는 파장 투과 필터를 구현할 수 있다.

그림 4(a)와 4(b)에서는 각각 길이가 다른 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자를 직렬로 연결하였을 경우 투과 특성에 대한 이론 및 실험 결과를 나타내고 있다. 이론 및 실험 결과에서 대역폭에서 차이가 나고 있지만 두 개의 위상 천이 장주기 격자를 직렬로 연결하였을 때 투과 스펙트럼 특성이 비슷하게 나타나고 있다. 일반적으로 장주기 광섬유 격자의 길이를 증가시키면 파장 제거 대역폭이 감소한다. 그림 4(a)와 4(b)에서 보는 바와 같이 격자 길이가 각각 2 cm와 5 cm인 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자의 투과 특성을 비교하면 5 cm인 경우가 파장 투과 대역폭이 좁은 것을 알 수 있다. 즉 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자의 경우에도 광섬유 격자 길이가 증가할수록 위상 천이에 의한 파장 투과 대역폭이 감소함을 알 수 있다. 그리고 길이가 다른 두 개의 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자들을 직렬로 연결하면 그림 4(a)와 4(b)에서 보는 바와 같이 파장 투과 대역은 길이가 긴 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자의 특성을 보여서 좁은 대역폭 특성을 나타내었고, 파장 제거 대역은 길이가 짧은 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자의 특성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 길이가 다른 두 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자들을 직렬 연결함으로써 투과 필터에서 파장 투과 및 제거 대역을 효과적으로 조절할 수 있다.

한편 위상 천이 장주기 격자를 제조하는 방법에는 여러 가지가 있는데 광섬유 격자의 절반을 UV레이저에 노출함으로써 위상 천이 광섬유 격자를 제조할 수 있다. 즉 광민감도에

의한 굴절률 변화 중 DC 성분이 변하기 때문에 커플링 세기는 감소하게 된다. 또한 위상 조건도 달라지므로 결국 투과 스펙트럼에 변화를 일으키게 된다. 또한 장주기 광섬유 격자의 투과 특성은 $\cos^2(L)$ 에 비례하기 때문에 초기 커플링 세기가 조절되며 이러한 초기 커플링 세기에 따라서 위상 천이 장주기 광섬유 격자의 투과 특성이 변한다. 이러한 특성을 알아보기 위해서 커플링 세기가 다른 장주기 격자를 제조한 후 격자 길이의 절반을 UV 레이저에 노출시키면서 위상 천이를 유도하고 그 때의 투과 특성을 측정하였다. 그림 5와 6에서는 초기 커플링 세기에 따른 위상 천이 장주기 광섬유 격자의 투과 특성에 대한 이론 및 실험 결과를 나타내고 있다. UV 레이저를 장주기 광섬유 격자 절반에 노출시키면 굴절률이 변화하므로 위상 천이를 유도할 수 있다. 그림 5에서는 불포화 장주기 격자에 대한 위상 변화에 따른 투과 특성을 나타내고 그림 6에서는 포화 장주기 격자에 대한 위상 변화에 따른 투과 특성을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 UV 레이저의 조사량(Fluence)에 따라 위상 천이가 유도되어 장주기 광섬유 격자의 투과 특성이 변함을 알 수 있다. 여기서 장주기 격자 길이는 2 cm로 하였다. 그림 5(a)와 5(b)에서 불포화 커플링 세기를 가지는 장주기 격자의 경우는 UV 레이저에 의해 위상 천이 크기가 증가할수록 투과도가 감소하면서 위상 천이 광섬유 격자의 투과 특성이 나타난다. 그리고 공진 파장이 장파장에서 나타나고 secondary peaks가 나타났다. 특히 이론에서는 secondary peaks가 공진파장을 중심으로 대칭적으로 나타났으나 실험에서는 비대칭으로 나타났다. 이것은 장주기 격자 제조시 Symmetry상의 실험 오차로 인한 문제이거나 또는 편광 특성 때문에 발생한 것으로 사료된다. 그리고 일정한 양의 위상 천이가 유도되면 더 이상 투과 특성이 변하지 않고 포화되는 특성이 나타났다. 공진 파장과 secondary peaks의 크기가 동일해지는 특성이 나타났다. 하지만 그림 6(a)와 6(b)에서 포화 커플링 세기를 가지는 장주기 광섬유 격자의 경우에는 투과도가 증가하면서

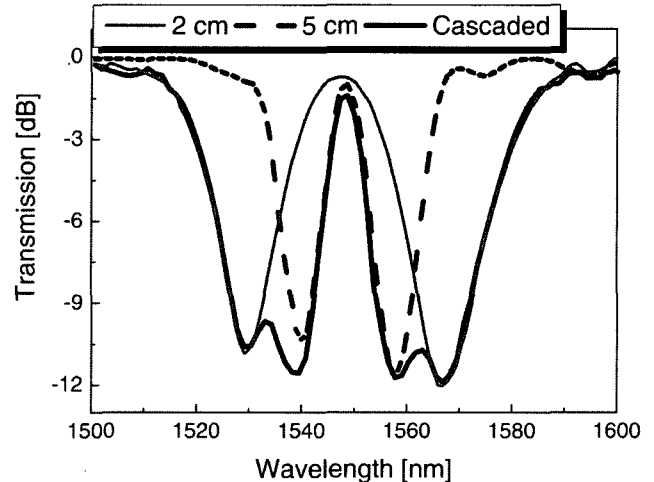
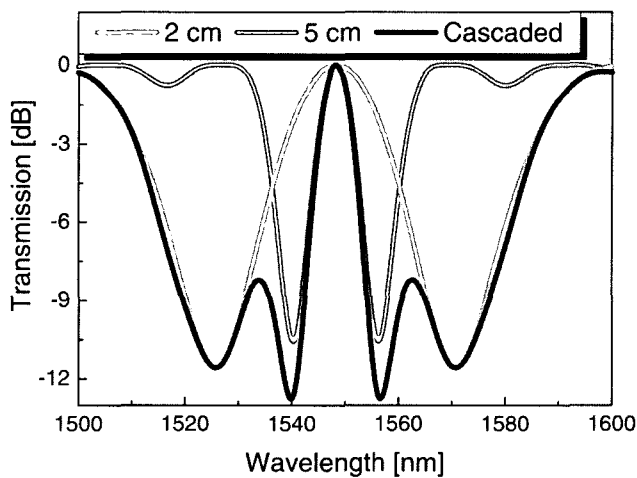


그림 4. 길이가 다른 두 개의 π -위상 천이 장주기 광섬유 격자를 직렬로 연결한 경우 투과 특성에 대한 이론(a) 및 실험 결과(b).

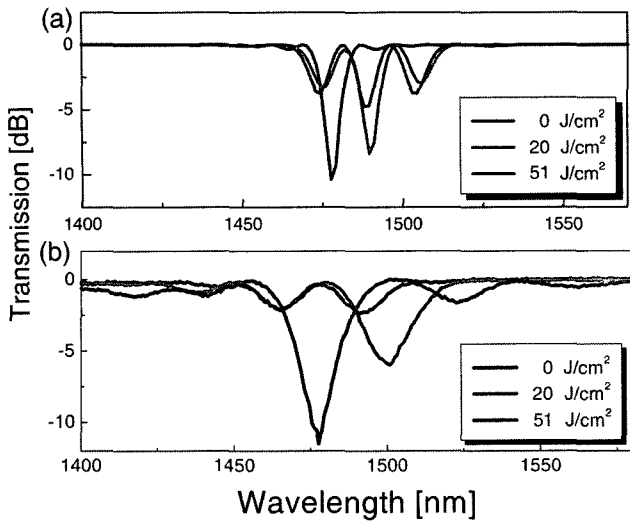


그림 5. 불포화 장주기 격자를 이용한 위상 천이 장주기 격자의 투과 특성에 대한 이론(a) 및 실험 결과(b).

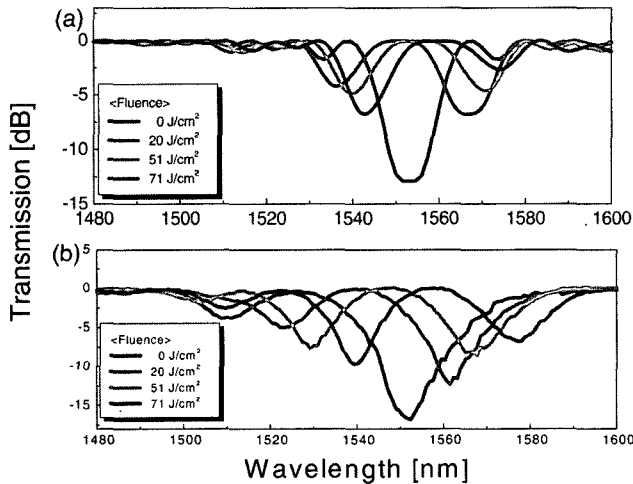


그림 6. 포화 장주기 격자를 이용한 위상 천이 장주기 격자의 투과 특성에 대한 이론(a) 및 실험 결과(b).

위상 천이 광섬유 격자의 투과 특성을 보인다. 즉 UV 조사량의 증가로 인한 위상 천이 정도가 증가함에 따라 main peak가 장파장으로 이동하고 왼쪽에 secondary peaks가 나타나고 위상 천이 정도가 더욱 더 증가하면 main peak가 두 개의 peaks로 나누어진다. UV 조사량을 더욱 더 증가시키면 유도되는 위상 천이가 포화되지 않고 오른쪽의 peak는 줄어들고 왼쪽의 peak의 크기가 증가하였다. 즉 불포화 장주기 격자에서와는 달리 인가되는 UV 위상 천이 크기에 따라서 다양한 형태의 위상 천이 장주기 광섬유 격자의 투과 특성을 나타내었다.

III. 결 론

본 연구에서는 위상 천이 광섬유 격자를 직렬로 연결하였

을 경우 파장 투과 특성에 대해서 이론 및 실험적으로 분석하였다. π 만큼의 위상 천이가 유도된 장주기 격자의 파장 투과 특성은 직렬 연결되는 위상 천이 장주기 격자의 개수에 따라 변화하며 개수를 증가시키기에 따라 파장 투과 대역폭을 증가시킬 수 있었다. 또한 π -위상 천이 장주기 격자의 파장 투과 대역폭은 격자 길이를 변화시키기에 따라 조절할 수 있으며 길이가 다른 두 개의 π -위상 천이 장주기 격자를 직렬로 연결하면 파장 투과 및 제거 대역폭을 조절할 수 있었다. 그리고 장주기 격자의 반을 UV에 노출시켰을 때, 위상 천이 장주기 격자가 형성됨을 관찰하였고, 초기 커플링 세기에 따라 격자의 형성이 달라짐을 관찰하였다. 본 실험 결과를 이용하여 다양한 투과 특성을 갖는 파장 투과 필터 설계 및 제작이 용이하며 광섬유 증폭기의 이득 평탄화 필터를 구현하는데 유용할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-003-D00293).

참고문헌

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- [2] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan and J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 58-64, 1996.
- [3] V. Bhatia, K. A. Murphy, and R. O. Claus, "Simultaneous Measurement Systems Employing Long-Period Grating Sensors," in *Proc. Optical Fiber Sensors-11*, pp. 702-705, 1996.
- [4] P. F. Wysocki, J. B. Judkins, R. P. Espindola, M. Andrejco and A. M. Vengsarkar, "Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 1343-1345, 1997.
- [5] Y. G. Han, S. B. Lee, and Y. Chung, "Compositional dependence of the temperature sensitivity in long-period fiber gratings with doing concentration of GeO_2 and B_2O_3 and their applications," *Opt. Eng.*, vol. 43, pp. 1144-1147, 2004.
- [6] J. R. Qian and H. F. Chen, "Gain flattening fiber filters using phase-shifted long period fiber gratings," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1132-1133, 1998.

Transmission Characteristics of Multiply Cascaded Phase-shifted Long-period Fiber Gratings and their Dependence on Initial Coupling Strength

Min-Sung Kim[†]

*Dept. of Information & Communications Engineering TongMyong University of Information Technology
535 Yongdang-dong, Nam-Gu, Busan, 608-711, KOREA*

Young-Geun Han

*Photonics Research Center Korea Institute of Science and Technology (KIST) 39-1 Hawolgok-dong,
Seongbuk-gu, Seoul 136-791, KOREA*

[†]*E-mail: minsung@tit.ac.kr*

(Received November 3, 2005, Revised manuscript January 20, 2006)

The transmission characteristics of multiply cascaded phase-shifted long-period fiber gratings(LPFGs) were investigated theoretically and experimentally. Their passband can be changed by increasing the number of p-shifted LPFGs. When two p-shifted LPFGs with different grating lengths are cascaded in series, the bandwidth of the rejection band and passband can be controlled by the pristine characteristics of two gratings. We also investigate the transmission characteristics of phase-shifted LPFG by exposing the half of LPFG region to UV laser. The transmission characteristics strongly depend on the initial coupling strength of the LPFG.

OCIS Codes : 060.2310, 060.2340.