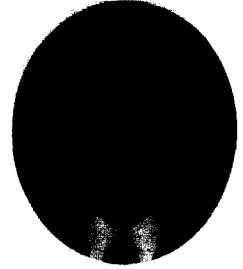


광섬유 격자 소자 기술



이 상 배



최 상 삼

한국과학기술연구원 광기술연구센터

요 약

광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating)는 광섬유 코어의 굴절율을 주기적으로 변조하여 특정 파장의 빛을 반사시키는 광섬유 소자로서 광섬유와의 연결 손실이 작고 파장 선택도가 높으며 편광에 무관한 특성 등으로 현재 전세계적으로 광통신용 소자나 광섬유 센서 등으로 활발히 연구되고 있다. 본 기술 해설에서는 이러한 광섬유 격자의 역사, 형성 원리 및 종류 등에 관해 알아보고, 단주기, 장주기 그리고 chirped 광섬유 격자의 특성에 대해 기술하였으며, 또한 광섬유 격자소자의 중요한 응용 분야인 광섬유 센서, 광섬유 레이저, 그리고 광통신에의 응용에 관해 소개하였다.

1. 서 론

광섬유 내에서 빛의 전파 원리는 굴절율이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행될 때, 그 경계면에서 일정한 각도 내의 빛이 모두 반사되는 전반사의 원리에 있으며, 광섬유 코어로 입사된 빛은 굴절율이 높은 코어층과 굴절율이 낮은 클래딩층의 경계면에서 반사되어 광섬유 코어부분을 따라 전파되게 된다. 이러한 광섬유의 주성분은 실리카 유리로 이루어져 있으며, 그 구조는 굴절율이 약간 높도록 게르마늄을 첨가한 광섬유 중심(core)부분과 중심을 보호하는 덧겹층(cladding) 부분으로 구성되어 있다.

광섬유 격자소자는 게르마늄이 첨가된 광섬유 코어 부분이 자외선 영역의 빛에 노출되면, 굴절률이 약간 증가하게 되는 현상을 이용하여 광섬유 격자를 개발하여 광통신이나 광섬유 센서로 뛰어난 성능을 나타내는 새로운 소자로 개발되었으며, 일부 개발품은 이미 상품화되어 판매되고 있을 정도로 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 기술 해설에서는 먼저 광섬유 격자의 역사, 형성 원리 및 종류 등에 관해 알아보고, 이의 중요한 응용 연구인 광통신, 광섬유 레이저 및 센서에의 응용에 관해 소개하고자 한다.

2. 광섬유 격자소자의 역사, 형성 원리 및 종류

2.1 Hill 광섬유 브래그 격자(Internally written grating)

1978년, Hill 등은 488 nm 파장의 단일모드 Ar⁺ 레이저를 Ge가 첨가된 광섬유 코어 내로 입사시켰을 때 브래그 격자가 광섬유 내에 형성됨을 최초로 관측하였다^[1]. 이러한 현상은 광섬유 끝단에서의 반사(Fresnel reflection)에 의한 빛과 입사된 빛이 정상파(standing wave)를 형성하고, 형성된 정상파의 주기적인 에너지 변화가 광섬유 코어 내에 주기적인 굴절율의 변화를 유도했기 때문이었다. 정상파에 의한 격자 형성의 원인에 대한 연구로써, 1981년 Lam 등은 굴절율의 변화량은, 이를 일으키는 UV 빛의 세기의 제곱에 비례하고, 굴절율 변화의 원인이 two-photon 흡수 과정에 의한 것이라고 설명했다^[2].

이렇게 제작된 최초의 광섬유 격자는 길이가 1 m였고, 488 nm에서 반사율이 88%였다.

2.2 홀로그래픽 방법(Holographic Method)

1989년 Meltz 등은^[3] 그림 2와 같이 GeO defect 흡수 대역에 해당하는 244 nm 파장의 코히런트한 UV 빛을 빔스플리터(beam splitter)를 이용하여 둘로 나누고 이를 거울을 이용하여 반사시켜 광섬유의 코어 위에 간섭무늬를 형성시켜 길이가 4.4 mm, 576 nm에서 반사율이 55%인 광섬유 격자를 제작하였다. 홀로그래픽 방법을 통해 광섬유 격자를 형성시키는 방법은 이전의 정상파를 사용하여 내부적으로 광섬유 격자를 형성시키

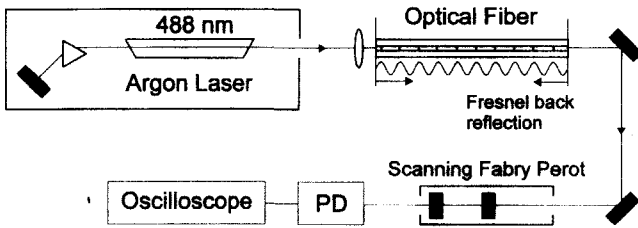


그림 1. Ar⁺ 레이저에 의해 발생한 정상파로 형성된 광섬유 격자.

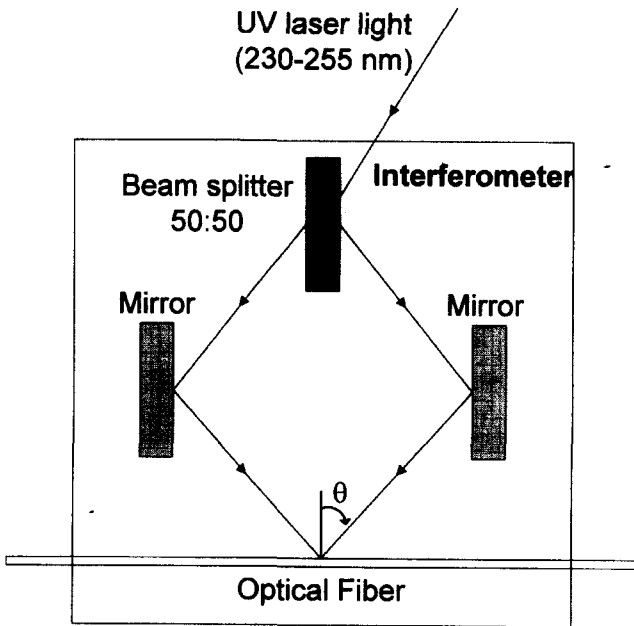


그림 2. Meltz 등이 실험한 광섬유 측면 조사 (홀로그래픽 방법)에 의한 광섬유 격자 형성.

는 방법에 비해 여러 가지 장점을 지니고 있었다. 가장 큰 장점은 기존의 방법이 고정된 브래그 파장만을 제작할 수 있었던 것에 비해, 홀로그래픽 방법은 격자를 형성시키는 두 빛의 각도를 조절하거나 사용되는 빛의 파장을 변화시켜 광섬유 격자의 브래그 파장을 선택할 수 있었다. 중심 파장이 λ_B 인 광섬유 격자를 형성하기 위한 두 UV 빛 사이의 각도 θ 는 다음과 같다.

$$\theta = \sin^{-1} \left[n \sin \left(2 \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_{UV}}{\lambda_B} \right) \right) \right]$$

(n: effective refractive index of the fiber core, λ_{UV} : writing wavelength)

또한 홀로그래픽 방법은 보강간섭에 의한 간섭무늬의 빛의 세기가 매우 강하기 때문에 굴절을 변화를 더 크게 일으켜 격자의 길이를 짧게 할 수 있었다. 이러한 특성들은 광섬유 격자를 광통신이나 광섬유 센서 등의 분야에서 이용될 수 있게 하

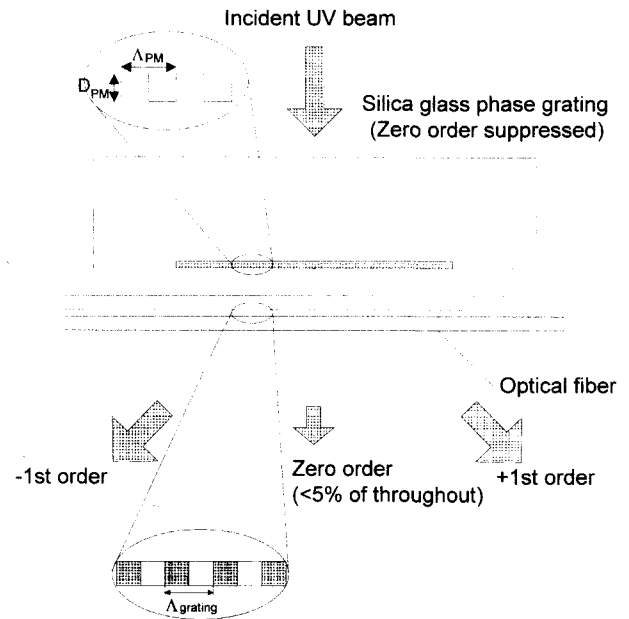


그림 3. 위상 마스크를 이용한 광섬유 격자 제작.

였으며, 1990년 Kashyap 등은 광통신 파장 대역인 1300 nm와 1500 nm에서의 광섬유 격자를 형성시켰다^[4]. 그러나, 이러한 홀로그래픽 방법은 간섭을 이용하는 제작 구조상의 특성으로 인하여 간섭을 일으키는 두 빛의 경로상의 작은 변화에도 큰 영향을 받기 때문에 높은 안정성이 요구되고, 또한 공간 간섭성(spatial coherence)이 큰 레이저를 사용해야 한다는 단점이 있다.

2.3 위상 마스크 이용법(Phase Mask Method)

1993년 Hill 등^[5]과 Anderson 등^[6]은 위상 마스크를 이용하여 격자를 새기는 새로운 방법을 동시에 발표하였다. 위상 마스크는 일종의 회절 광학 소자(Diffractive Optical Element)로서, 격자 형성용 UV 빛을 통과시켜 공간에 따른 위상차를 유도하여 UV 빛의 간섭무늬를 광섬유 코어 내에 형성시키도록한 간섭형 마스크이다. 위상 마스크는 그림 3과 같이 마스크의 골의 깊이(DPM)를 조절함으로써 위상 마스크에 수직으로 인가된 UV 빛의 0차 회절은 수 % 이내로 하고, 1차 회절을 최대로 하여 이 빛들을 이용하여 광섬유의 코어에서 간섭을 일으킨다. 따라서 0차 회절된 빛은 위상 마스크의 골과 마루사이만큼의 위상차를 가져야 한다.

$$\frac{2\pi(n_{UV}-1)D_{PM}}{\lambda} = \pi$$

여기서, n_{UV} 는 입사되는 UV 빛에 대한 위상 마스크의 굴절

울, λ 는 UV 빛의 파장을 나타낸다. 위상 마스크를 이용하여 광섬유 격자를 제작한 경우의 브래그 파장(Bragg)과 위상 마스크의 풀 간격사이(PM)의 관계는 다음과 같다.

$$\Lambda_{PM} = 2 \times \Lambda_{grating}$$

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff} \Lambda_{grating} = n_{eff} \Lambda_{PM}$$

홀로그래픽 방법과 비교할 때 위상 마스크를 사용하는 방법은 격자 형성용 UV 빛의 가간섭성 길이에 관계없이 광섬유 격자를 만들 수 있으므로 저가의 UV 레이저를 사용할 수 있고, 단순히 하나의 광학 소자를 사용하므로 시스템이 훨씬 간단해지며, 보다 안정적으로 광섬유 격자를 만들 수 있기 때문에 광섬유 격자를 대량으로 제작할 수 있다는 장점이 있다.

3. 광섬유에서의 광민감성 (Photosensitivity in Optical Fiber)

현재 광섬유의 재료가 되는 무정형 (amorphous) 형태의 4면체 구조의 순수한 실리카(SiO_2)는 160 nm 근처에 흡수 대역을 가지고 있다. 실리카에 게르마늄(Ge)이 첨가되면 SiO_2 와 같은 구조의 GeO_2 로 존재하다가 모재(preform) 제작시에 사용되는 GeO_2 의 양에 따라 GeO(Oxygen deficient germanium) defect가 형성된다. GeO defect가 발생하면, Ge 원자는 세 개의 산소와 하나의 Ge 혹은 Si 원자와 결합하며 구조는 그림 4의 (a)와 같다.

이러한 GeO defect는 중심파장이 240 nm이고 대역폭이 약 30 nm인 흡수 대역을 갖고 있으며 Ge가 첨가된 광섬유에서 나타나는 광민감성(photosensitivity)은 240 nm 근처의 바로 이 대역에서 관찰되거나 이 240 nm에서의 two-photon 흡수가 최대가 되는 가시 영역(약 480 nm)에서 관찰된다. 따라서, 광민감성에 대한 연구는 주로 GeO defect에 의한 240 nm 흡수대역과 이것과 광섬유 코어의 굴절율 변화와의 관계에 대해 이루어졌다. 최근 강한 UV 빛의 조사에 의한 240 nm 주변에 흡수 피크(peak)가 소멸되는 것이 관측되었고^[7], Atkins는 UV 조사에 의

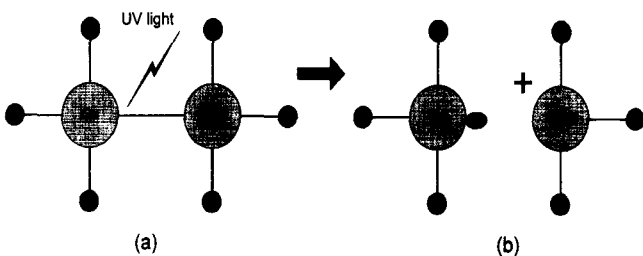


그림 4. GeO (Oxygen-deficient germanium) defect 모델. (a) 세 개의 산소와 하나의 Ge 혹은 Si 원자와 결합하고 있는 GeO defect, (b) UV 빛에 의해 결합이 끊어지면서 생성된 GeE

한 굴절율의 변화와 240 nm 흡수대역에서의 변화에 대한 상호 관계를 조사하였다^[8,9]. 그림 2와 같이 입사한 UV 빛은 GeO defect의 결합을 깨고 굴절율의 변화를 일으키는 GeE defect를 형성하고, 이러한 변화는 클래딩의 경우 Ge를 갖고 있지 않기 때문에 클래딩에서의 굴절율의 변화는 코어에 비해 거의 무시할 정도로 나타나지 않는다.

Ge가 첨가된 광섬유에서 광민감성을 높이기 위하여 William 등은 붕소(B)를 같이 첨가하여 10^{-3} 의 굴절율 변화량을 얻었으며^[10], 광섬유를 수소 처리하는 경우 5.9×10^{-3} 의 굴절율 변화를 나타내었다^[11]. 그러나, 현재까지는 여러 다른 그룹들 사이의 실험 결과가 일치하지 않고 있으며, 광민감성 현상의 미세한 메카니즘은 아직도 불분명한 상태이다.

실리카 유리 광섬유에서 광민감성을 갖는 것은 Ge 뿐만 아니라 cerium, europium 그리고 Er과 Ge가 같이 있는 경우에도 광민감성을 가지며, Ge와 B가 같이 첨가되어 있는 경우에 가장 큰 광민감성을 보인다고 보고되었다. 또한 Niay 등은 cerium, erbium이 첨가된 fluorozirconate 광섬유에서 246 nm의 파장을 이용하여 광섬유 격자를 형성시켰으며^[12], P가 첨가된 광섬유는 190 nm 근방의 파장에 노출될 경우 굴절율의 변화가 유도된다고 보고되었다^[13].

Ge가 첨가된 단일모드 광섬유에서 수소는 좋은 GeO 결합 형성 물질이므로 광민감성을 증대시킬 수 있다. 수소처리법은 일반적으로 고온처리법, 저온처리법, 불꽃처리법 등이 있는데, 고온처리법은 100°C, 120기압의 수소에 광섬유를 48시간 정도 광섬유를 처리하는 방법이며^[14], 저온처리법은 상온에서 800기압 이상의 고압으로 광섬유를 수소 처리하는 방법이고^[15], 불꽃처리법은 산소 수소 불꽃으로 시료를 10분정도 처리하여 광민감성을 증진시키는 방법이다. 이렇게 처리된 광섬유는 항구적인 광민감성을 광섬유에 부여할 수 있으며, 변화된 광섬유 굴절율의 변화도 계속 유지된다고 보고되었다^[16]. 한편 30 Mw/cm² 이상의 고에너지 밀도에서는 자외선 광펄스로 광섬유 격자소자가 형성되는데 이것을 type II 광섬유 격자 혹은 "손상 격자"라고 한다. 이러한 형태의 광섬유 격자는 고에너지 밀도로 인해 강한 열이 발생하며, 이로 인해 광섬유 코어 물질에 물리적 손상이 발생되기 때문에 발생된다고 이해되고 있다^[17]. 이런 격자는 강하며 1000°C 정도의 고온에서도 광섬유 격자 성질이 유지되므로 고온에서 광섬유 센서로 활용될 수 있다.

4. 광섬유 격자 소자의 특성

4.1 단주기 광섬유 격자 소자

일반적으로 광섬유 격자라고 부르는 것은 단주기 광섬유 격

자으로써 격자의 주기가 약 $0.5 \mu\text{m}$ 내외이며, 광섬유 격자의 길이가 수 mm에서 10 mm 정도되는 광섬유 격자를 지칭한다. 이러한 광섬유 격자를 이용하여 파장대역 반사 필터, 파장 투과 필터, 광섬유 레이저 및 반도체 레이저의 외부 반사거울, 광섬유 격자 페브리 페로 에탈론, 광섬유 격자 센서망 등에 가장 많이 응용되고 있다.

광섬유 격자를 제작하는 데에는 사용되는 자외선 레이저로는 KrF 엑시머레이저(248 nm), XeCl 엑시머레이저로 여기된 dye 레이저의 2차 hamonic 레이저(244 nm), Ar 레이저의 2차 hamonic 레이저(244 nm), 그리고 Nd-YAG 레이저의 4차 hamonic 레이저(265 nm) 등이 사용되고 있다.

위상 마스크를 사용하여 광섬유 격자를 제작하는 경우 먼저 0차회절(직진하는 빛의 성분)되는 빛의 세기가 5% 이하이며, ± 1 차회절 되는 빛의 세기가 30% 이상이 되어 ± 1 차의 두 회절 빛이 광섬유에 간섭 무늬를 형성하여 광섬유 격자가 새겨지도록 특수하게 설계된 위상 마스크를 사용해야 한다. 광섬유 격자를 제작시 사용하는 광섬유는 Ge가 많이 첨가된 광섬유나 Ge와 B가 첨가된 광섬유를 사용하며, 일반 통신용 광섬유를 사용할 때에는 반드시 수소처리를 하여 사용해야 한다. 본 연구실에서는 그림 5와 같은 실험 장치로 광섬유 격자를 제작 사용하였는데, 이때 KrF 엑시머 레이저(펄스당 에너지 400 mJ, 파장 248 nm, 펄스폭 20 ns)는 펄스 반복률을 5 Hz로 사용하였고, KIST에서 제작된 K41104($1.5 \mu\text{m}$ 용, Ge 18.7 mol%, Boron 22 mol%) 광섬유와 주기가 $1.06 \mu\text{m}$ 인 위상마스크를 사용하여 제작한 광섬유 격자의 광투과 특성은 그림 6과 같다. 광섬유 격자소자를 제조하는 동안 $1.5 \mu\text{m}$ LED와 optical spectrum analyzer(Anritsu MS9001B)를 이용하여 광투과 특성을 계속 측정함으로써 광섬유 격자소자의 성장을 관찰하였다. 제작된 광섬유 격자는 1535.4 nm 에서 광투과율이 약 -22.4 dB이었고, 선폭은 약 0.3 nm 이었다.

4.2. 장주기 광섬유 격자 소자

일반 광섬유 격자의 한 주기가 $0.5 \mu\text{m}$ 인데 비해 장주기 광섬유 격자는 한주기가 약 $300\text{-}800 \mu\text{m}$ 로써 선폭은 수십 nm에 이른다. 일반 광섬유 격자는 코어로 입사된 기본모드가 격자에 의해 브래그 조건에 해당하는 파장만을 반대 방향의 코어 모드로 커플링(coupling) 시키는 반면, 장주기 광섬유 격자는 진행하는 기본모드의 빛을 특정 파장의 진행 방향의 클래딩 모드와 커플링시켜 감쇄시키는 원리를 이용한 것이다. 그러므로 광섬유 격자의 주기를 적절하게 설계하면^[18,19] 원하는 파장에서 모드 커플링이 일어나게 할 수 있다. 코어내로 진행하는 모드와

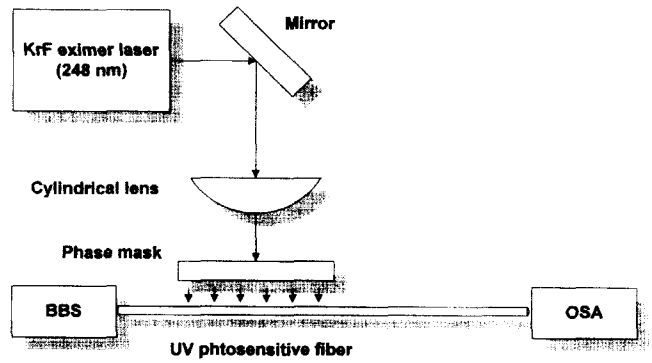


그림 5. 위상 마스크를 이용한 격자 제작 실험 장치도.

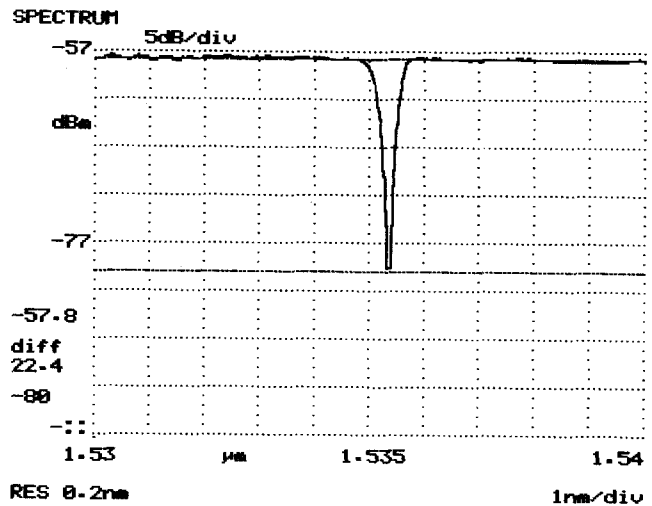


그림 6. 단주기 광섬유 격자의 광투과 스펙트럼.

진행 방향의 클래딩 모드들 간의 위상 정합 조건(phase matching condition)은 다음과 같다.

$$\beta_{01} - \beta_{cl}^{(n)} = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

여기서, Λ 는 기본 모드를 n-th 클래딩 모드로 커플링 시키기 위한 격자 주기이고, β_{01} 은 기본 모드(LP₀₁)의 전파 상수(propagation constant), $\beta_{cl}^{(n)}$ 은 n-th 클래딩 모드의 전파 상수이다.

장주기 광섬유 격자의 특정 파장 제거 대역은 30 nm 이상으로 매우 넓으며, 삽입 손실(insertion loss)이 작고, 제거된 특정 파장 성분은 진행 방향의 클래딩 모드로 빠져 나가기 때문에 EDFA의 NF(Noise Figure)에 영향을 미치지 않기 때문에 EDFA의 이득 평탄화용 필터로써 좋은 특성을 보인다.

광섬유 광증폭기는 파장에 따라 이득이 다르므로 파장분할 다중 통신(Wavelength Division Mutiflexer) 광통신을 할 경우 파장에 따른 이득이 달라지게 되므로, 광섬유 광증폭기에 장주기 광섬유 격자소자를 부착하여 WDM용으로 제작하면 일정

대역 파장들에 대해 고른 출력을 얻을 수 있다^[20]. 본 실험실에서는 삼성전자와 공동으로 다음과 같은 방법을 이용하여 장주기 광섬유 격자를 제작하였다. 먼저 빔사이즈 24×6 mm, 발진 파장 248 nm인 KrF 엑시머 레이저의 광원을 원통형 렌즈를 이용하여 단위 면적당 광세기 분포가 높도록 집광한 후 실험하였고, 주기가 480 μm인 진폭마스크를 제작 사용하였으며, 수소 처리된 Ge첨가 실리카 광섬유에 길이 2.5 cm의 장주기 광섬유 격자를 성장시켰다. 제작시 광섬유 격자의 광투과 스펙트럼은 분광분석기(Optical Spectrum Analyzer)를 이용하여 실시간 측정하였다. 실험결과 펄스 조사시간에 따라 커플링 피크는 장파장쪽으로 이동하였으며, 에너지가 클수록 펄스반복율이 높을수록 이동속도가 빨라짐을 관찰하였다. 초기의 rejection 피크 파장의 이동은 시간에 대해 선형적이나 시간이 지남에 따라 점차로 둔화되는데, 이는 UV 광원에 반응하게 되는 defect center가 포화되기 때문이다. FWHM(full-width at half maximum)의 경우 일반 통신용 광섬유는 35 nm 정도로 EDFA의 이득평탄화에는 적합하지 않은 것을 알 수 있었고, 분산전이 광섬유의 경우는 14 nm 정도로 일반 광섬유에 비해 아주 작은 값을 가짐을 관찰하였다. 분산전이 광섬유에 제작된 장주기 광섬유 격자소자를 EDF에 연결하여 ASE 대역 제거 및 이득평탄화를 관찰한 결과(그림 8)에서와 같이 30 nm 대역에서 0.8 dB의 이득평탄화를 얻을 수 있었다.

4.3. Chirped 광섬유 격자 소자

Chirped 광섬유 격자는 단주기 광섬유 격자의 주기가 점차적으로 변화하는 광섬유 격자 소자이다. 이러한 광섬유 격자는 입사되는 광원의 파장에 따라 시간차가 생기게되므로, 통신용 광섬유 선로를 따라 진행되는 광원이 광선로의 분산특성에 의해 분산되었을 때 광분산을 보상할 수 있어 초고속 광통신이 가능하다. 이러한 chirped 광섬유 격자는 크기가 작고 광신호의 비선형 현상을 일으키지 않는 등 분산 보상 광섬유(DCF-dispersion compensated fiber)에 비해 여러 장점을 지니고 있어 새로운 광신호 분산 보상을 소자로서 전 세계적으로 활발히 연구되고 있다^[21].

Chirped 광섬유 격자의 격자 위치가 달라지면서 격자 주기 역시 변화하기 때문에 진행하는 빛도 파장별로 다른 위치에서 반사되어 나온다. 따라서 빨리 진행하는 빛을 광섬유 격자의 끝단에서 반사시키고 느리게 진행하는 빛을 격자의 앞부분에서 반사시킴으로써 광신호의 분산을 보상시킬 수 있게 된다. 현재 길이가 40 cm, 대역폭이 4 nm인 두 개의 chirped 광섬유 격자를 이용하여 40 Gbit/s의 신호를 109 km까지 전송한 결과

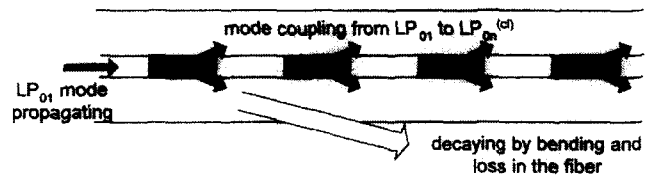


그림 7. 장주기 광섬유 격자의 기본원리.

가 발표되어 있으며^[22], 광섬유 길이가 120 cm인 Chirped 광섬유 격자를 이용하여, 8채널의 10 Gbit/s 광신호를 110 km 전송한 실험이 보고되었다^[23]. Chirped 광섬유 격자를 제작하는 방법으로는 step-chirped 광섬유 격자 방법, 이중 노출 방법, 위상 마스크를 이동시켜 만드는 방법 등이 있다.

5. 광섬유 격자 소자의 응용

5.1 광섬유 격자 소자 센서

광섬유 센서는 전자기 간섭에 영향을 받지 않고 감도가 높으며, 소형, 경량이므로 보통의 센서가 사용될 수 없는 위험한 장소나 고감도를 요하는 특수목적에 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 광섬유 센서는 광섬유를 통과하는 빛의 진폭, 위상, 혹은 편광 등을 이용하여 측정하고자하는 물리량의 변화 즉, 전자기장의 세기, 회전율, 온도, 압력, 수위, 음향, 가스농도 등을 측정할 수 있으므로 이에 대한 기초 및 응용 연구가 1970년대 후반부터 이루어져왔다. 그러나 고전적인 광섬유 센서의 문제는 대체적으로 신호대 잡음 지수가 낮으며, 특정 지점을 측정하기 위해서는 광섬유를 절단하여 코팅한다든지 기타 특수 처리된 광섬유 센서를 사용해야하는 문제가 있었다. 그러나 광섬유 격자는 광섬유 측면에 조사하여 광섬유의 특정 부위에 원하는 파장에 대해서 반사 특성을 보이는 브래그 격자를 새길 수 있음을 보인 이후 광섬유 센서의 연구가 괄목할만한 발전을 이루었다. 보고된 바에 의하면^[24] 광섬유의 강도를 저하 시키지 않고 1% strain에 의해 12 nm 영역에 걸친 Bragg 파장의 가변이 이루어질 수 있으며, 압축력에 의해 약 32 nm의 파장 가변이 이루어졌으며^[25], 또한 100°C 정도의 주위 온도 변화로 1.1 nm의 파장 가변이 이루어졌다. 예를 들면 약 0.01 nm Bragg 파장을 정확히 이동시키기 위해서는 strain과 온도의 분해능은 각각 대략 8 μ strain과 0.9°C이며, 다른 실험 장치를 통해 더 큰 분해능은 갖도록 하여 더 작은 Bragg 파장의 이동을 측정할 수 있다. 이러한 파장의 이동은 다른 광섬유 격자 소자와 광섬유 파브리 페로 공진기 같은 형태의 광학 필터 또는 비대칭 Mach-Zehnder 간섭계로 관찰할 수 있었고, 또한 간단한 장치로 온도 변화에 무관한 스트레인 측정 장치를 구성할 수도 있

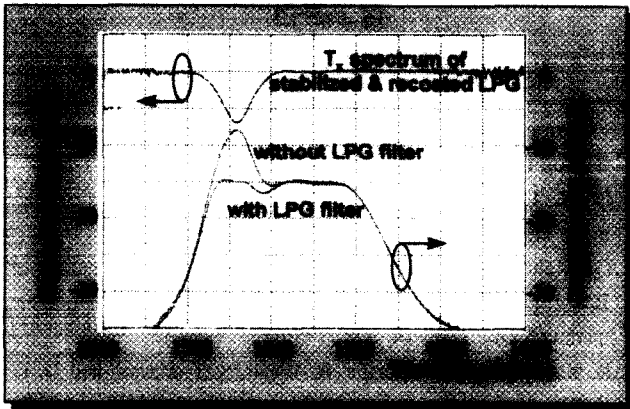


그림 8. 장주기 격자필터를 이용한 이득평탄화된 광섬유 증폭기.

다^[26]. 또한 다중점(multi-point) 센서로의 확장이 용의하며 이를 이용하면 교량 및 건축물의 사전 감시 시스템을 구성할 수 있고, 또한 복합 구조물에 대한 진단이나 음향센서 어레이로서 성공적으로 시험되었다. 광섬유 격자 센서의 응용은 캐나다 Calgary에서 고가차도용 콘크리트 구조물에(길이 65ft) 4개의 광섬유 격자소자 센서를 넣어 총 5개의 구조물을 광섬유 격자 센서 어레이로 감시 시스템을 구성하였으며^[27], 유럽의 EUROPEAN BRITE-EURAM(no.BE5553 of CEC) STABILOS project는 광섬유 격자소자 센서 기술을 바탕으로 탄광이나 터널굴착 및 폭발 작업환경에 대한 안정성을 증진시키는 정밀 안정 control system 구축에 그 목적이 있다. 현재 이 과제는 진행 중이며 중간결과로서 평가할 때 광섬유 격자소자를 이용한 센싱과 demultiplexing 시스템은 단순하고도 효율적이며, 적정화된 광섬유 cable과 센서로 구성될 때 시설물 뿐만 아니라 탄광, 터널의 굴착시 안정성을 확보하는 확실한 방법으로 인식되고 있다^[28].

5.2 광섬유 격자 소자를 이용한 레이저

광섬유 격자소자는 일반적으로 0.1-0.3 nm의 파장 대역을 가지며 광반사율이 99% 이상 되는 특성을 가지므로 레이저 거울로 사용하기에 매우 적합한 소자이며, 특히 광섬유로 레이저 공진기를 구성할 경우 그 연결 효율이 극대화되어 소형이며 특성이 뛰어난 레이저를 구성할 수 있다. 그러므로 광섬유 격자소자가 최초로 개발된 직후 광섬유 레이저에 응용되었으며, 현재에도 광섬유 레이저에 대한 응용연구가 매우 활발하다. 이러한 연구의 대부분은 파브리 페로형 1.55 μm Er 첨가 광섬유 레이저이며, 연구의 주요목표는 광통신용 광원 및 센서용의 광섬유 레이저 개발과 관련된 것들이다. 파장다중 WDM 통신이나 센서 시스템은 특정 파장 간격을 갖는 파장열의 저장용 레이저

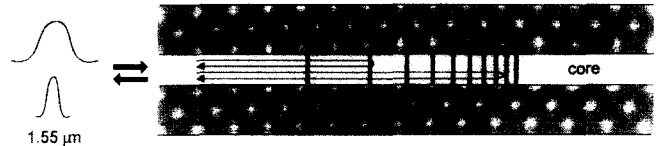


그림 9. 광신호 분산 보상용 chirped 광섬유 격자.

어레이들을 필요로 한다. 그리고 경우에 따라 파장 선택성 뿐만 아니라 파장가변성이 필요하다.

한편 현재의 광통신용 광원으로써 DFB 반도체 레이저를 사용하는데, 이 소자는 레이저 공진기 내에 굴절을 격자가 있어 15 MHz 정도의 선평으로 발진된다. 그러나 제조상의 오차 때문에 굴절을 격자의 제조시 원하는 특성과 정확히 일치하는 기판을 얻기 어려워 원하는 파장의 DFB 반도체 레이저를 얻기가 어려운 반면에, 광섬유 Bragg 격자 레이저는 광섬유 격자 제작의 편의성 때문에 원하는 파장의 광섬유 레이저를 쉽게 만들 수 있고, 또한 광섬유 격자를 외부공진기로 사용하여 반도체 레이저를 발진시킴으로써 원하는 파장에서 단일파장으로 발진시키거나 발진파장을 가변시키기 쉽다. 또한 광섬유 광증폭기의 여기광원으로 주로 쓰이는 980 nm 발진 반도체 레이저는 레이징이 일어나는 층에 strain을 가해 강제로 파장을 변화시킴으로써 발진 파장을 맞추고 있다. 이 대역의 어블침가 광섬유는 광흡수 대역이 ± 2 nm 정도이므로 여기용 광원의 파장 안정성이 매우 중요하나, 반도체 레이저에 인가되는 전류의 양에 따라 발진파장이 변화하거나 불안정하여 광섬유 광증폭기의 안정성에 영향을 미친다. 그러므로 현재 980 nm 발진 여기용 광원의 출력단에 낮은 광반사율의 광섬유 격자소자를 연결하여 제품화하는 것이 일반화된 방법이다.

현재까지 보고된 광섬유 격자소자를 이용한 파브리 페로형 광섬유 레이저의 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저 고출력 광섬유 레이저의 경우 Yb 첨가 실리카 광섬유를 869 nm 파장에서 550 mW의 Ti-sapphire 레이저로 여기하여 발진파장 1019 nm에서 약 200 mW의 광출력을 얻었으며^[29], thulium 첨가 실리카 광섬유에 808 nm 파장에서 900 mW의 Ti-sapphire 레이저로 여기하여 발진파장 2102 nm에서 약 200 mW의 광출력을 얻은 보고가 있다^[30]. 한편 어블침가 실리카 광섬유의 경우 한 개의 레이저 거울과 한 개의 광섬유 격자를 사용하여 레이저 공진기를 구성한 후, 980 nm 파장 150 mW 출력의 여기광원을 사용하여 1530.2 nm 파장에서 선평이 1.3 GHz이고 peak power가 100 W이며, 펄스폭이 20 ns이고 펄스반복비가 200 Hz인 Q-switching된 광섬유 레이저를 발진시켰다^[31].

5.3 기타 광통신에의 응용

참고문헌

주파수나 모드 조정을 위해 반도체 레이저에서 외부공진기 반사경으로 Bragg 격자를 이용할 수 있다. 1990년에 광섬유 Bragg 격자를 이용하여 저가의 파브리 페로형 레이저 다이오드의 주파수 조정이 처음으로 실현되었다^[32]. 이후에, 반도체 증폭기의 외부공진기로써 4개의 광섬유 격자들을 스위칭하여 사용함으로써 WDM용 광원을 제작하는 연구도 진행되었다^[33].

또한 중요한 응용 분야의 하나는 WDM광통신을 위한 전광분기결합기(Add/Drop Multiplexer)인데, 이것은 Michelson 간섭계나 편광분리기를 이용하여 Bragg 공명근처의 파장만을 투과시키고 나머지 파장에 대해서는 투과시키는 특성의 특수한 필터를 구성할 수 있다^[34,35]. 이것은 WDM광통신에 필수적인 소자로서 광섬유 격자를 이용한 응용분야중 가장 경쟁이 치열한 분야중의 하나이다. 이외에도 실리카 광도파로에 제작된 광섬유 격자소자를 이용하는 방법 등 여러 가지 응용분야가 확대되고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 광섬유 격자의 역사, 형성 원리 및 종류 등에 관해 알아보고, 단주기, 장주기 그리고 chirped 광섬유 격자의 특성에 대해 기술하였으며, 또한 광섬유 격자소자의 중요한 응용 분야인 광섬유 센서, 광섬유 레이저, 그리고 광통신에의 응용에 관해 소개하였다. 광섬유 격자소자는 현재 개발되고 있는 파장분할 다중화 통신에서의 수요와 잘 일치하여 그 응용분야가 더욱 확대되고 있다. 파장분할 다중화통신은 그 원리상 동일한 광선로에 다양한 파장의 빛을 전송하는데 전송되는 파장이 다른 빛들을 합치거나 분리하거나, 다양한 파장의 빛을 주어진 곳에 연결하기 위해서는 파장분리형 광섬유 격자 소자들이 필수적으로 사용되고 있으며, 파장분할 다중화 통신용 광원과 광섬유 증폭기에도 응용되고 있다. 또한 초고속화 되고 있는 시간분할 다중화통신에서도 기존 광선로의 광분산은 중요한 문제로 부각되어 이의 해결 방법중 하나로 chirped 광섬유 격자를 이용하고 있다. 광섬유 격자는 이러한 광통신 분야뿐만 아니라 광섬유 센서분야에서도 특정지점의 물리량을 측정시 뛰어난 신호처리 특성을 나타내고 있으며, 파장이 다른 광섬유 격자를 연결 사용함으로써 수십개 이상 지점의 물리량을 동시에 측정 가능할 수 있어 수중센서, 건축물 감시시스템등 다양한 분야에 응용되고 있다. 향후 광섬유 격자는 파장분할 다중화 통신의 보급이 활발해질수록 더욱 사용 분야가 확대될 전망이다. 광섬유 격자센서의 분야에서도 더욱 다양하게 응용될 전망이다.

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.*, **32**, 647 (1978).
2. D. K. Lam and B. K. Garside, "Characterization of single-mode optical fiber filters", *Appl. Opt.*, **20**, 440 (1981).
3. G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Opt. Lett.*, **14**, 823 (1989).
4. R. Kashyap, J. R. Armitage, R. Wyatt, S. T. Davey, and D. L. Williams, "All-fiber narrowband reflection gratings at 1500 nm", *Electron. Lett.*, **26**, 730 (1990).
5. K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1035 (1993).
6. D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, and A. E. White, "Production of in fiber gratings using a diffractive optical element", *Electron. Lett.*, **29**, 566 (1993).
7. D. L. Williams, S. T. Davey, R. Kashyap, J. R. Armitage, and B. J. Ainslie, "Direct observation of UV induced bleaching of 240 nm absorption band in photosensitive germanosilicate glass fibers", *Electron. Lett.*, **28**, 369 (1992).
8. R. M. Atkins, "Measurement of the ultraviolet absorption spectrum of optical fibers", *Opt. Lett.*, **17**, 469 (1992).
9. R. M. Atkins, and V. Mizrahi, "Observation of changes in UV absorption bands of singlemode germanosilicate core optical fibers on writing and thermally erasing refractive index gratings", *Electron. Lett.*, **28**, 1743 (1992).
10. D. L. Williams, B. J. Ainslie, J. R. Armitage, R. Kashyap, and R. Campbell, "Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres", *Electron. Lett.*, **29**, 45 (1993).
11. P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. A. Reed, "High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO2 doped optical fibers", *Electron. Lett.*, **29**, 1191 (1993).
12. P. Niay, P. Bernage, T. Taunay, W. X. Xie, S. Boj, E. Delevaque, H. Poignant, and M. Monerie, CLEO'94, post-deadline paper CPD9, 21, (1994).
13. T. Kitagawa, K. O. Hill, D. C. Johnson, B. Malo, J. Albert, S. Theriault, and F. Bilodeau, OFC'94, Technical Digest, PD17, 79, (1994).
14. F. Ouellette, K. O. Hill, and D. C. Johnson, "Enhancement of second-harmonic generation in optical fibres by hydrogen heat treatment", *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1086 (1989).
15. P.J.Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. A. Reed, "High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO2 doped optical fiber", *Electron. Lett.*, **29**(13), 1191-1193 (1993).
16. K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo, J. Albert, D. C. Johnson, Y.

- Hibino, M. Abe, and M. Kawachi, "Photosensitivity of optical fibre and silica on silica/silicon waveguides", *Opt. Lett.*, **18**(12), 953 (1993).
17. L. Dong, J. L. Archambault, L. Reekie, P. St. J. Russel, and D. N. Payne, "Single pulse Bragg gratings written during fiber drawing", *Electron. Lett.*, **29**(17), 1577 (1993).
 18. A. M. Vengsarka, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, J. E. Spie and T. Erdogan, "Long-period fiber grating band-rejection filters", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **14**, 58 (1996).
 19. S. Y. Kim, S. B. Lee, T. S. Park, S. S. Choi, J. N. Jang, and K. H. Kwack, "Design and Fabrication of Long Period Grating", *Proc. of Photonics Conference96*, 124 (1996).
 20. A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, *J. of Lightwave Technol.*, **14**, 58 (1996).
 21. F. Ouellette, "Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides", *Opt. Lett.*, **12**, 847 (1987).
 22. L. Dong, M. J. Cole, A. D. Ellis, M. Durkin, M. Ibsen, V. Gusmeroli, and R. I. Laming, 40 Gbit/s 1.55 μm Transmission over 109 km of non-dispersion shifted fibre with long continuously chirped fibre gratings, in *Proc. Conference on Optical Fiber Communications*, OFC97 paper PD6-1 (1997).
 23. M. J. Cole, H. Geiger, R. I. Laming, S. Y. Set, M. N. Zervas, W. H. Loh, and V. Gusmeroli, "Continuous chirped, broadband dispersion-compensating fiber gratings in a 10 Gbit/s 110 km standard fibre link", in *Proc. of 22nd European Conference on Optical Communications*, ThB.3.5 (1996).
 24. Q. Zhang, D. A. Brown, L. Reinhart, T. F. Morse, J. Q. Wang, and G. Xiao, Tuning Bragg wavelength by writing gratings on prestriated fiber, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 839-841 (1994).
 25. G. A. Ball and W. W. Morey, Compression-tuned sing-frequency Bragg-grating fiber laser, *Opt. Lett.*, **19**, 1979-1981 (1994).
 26. M. Song, B. Lee, S. B. Lee, S. S. Choi, "Interferometric temperature insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings", *Opt. Lett.*, **22**, 790 (1997).
 27. R. M. Measures *et al.*, Bragg Grating Laser Sensing systems for smart structure, LEOS '93, San Jose, p 137 (1993).
 28. P. Ferdinand *et al.*, Mine Operating Accurate STABILITY Control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology: The European BRITE/EURAM STABILOS Project, *J. of Lightwave Technol.*, **13**(7), 1303, July (1995).
 29. J. Y. Allain, J. F. Bayon, M. Monerie, P. Bernage and P. Niay, "Ytterbium-doped silical fiber laser with intracore Bragg gratings operating at 1.02 μm ", *Electron. Lett.*, **29**, 309 (1993).
 30. S. Boj, E. Delevaque, J. Y. Allain, J. F. Bayon, P. Niay, and P. Bernage, "High efficiency diode pumped thulium-doped silica fiber lasers with intracore Bragg gratings in the 1.9-2.1 μm band", *Electron. Lett.*, **30**, 1019 (1994).
 31. G. P. Lees, M. J. Cole, and T. P. Newson, "Narrow linewidth Q-switched erbium-doped fiber laser", *Electron. Lett.*, **32**, 1299 (1996).
 32. W. W. Morey *et al.*, Tunable narrow band external-cavity diode lase with an embedded fiber grating reflector, LEOS conf. on New Semiconductor Laser Devices and Applications, Monterey, SCW5, (1990).
 33. I. Baumann, J. Seifert, W. Nowak and M. Sauer, "Compact all-fiber add-drop multiplexer using fiber Bragg gratings", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1331 (1996).
 34. S. Y. Kim, S. B. Lee, J. Chung, S. Y. Kim, I. J. Park, J. Jeong, and S. S. Choi, "Highly stable optical Add/Drop multiplexer using polarization beam splitters and fiber Bragg gratings", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 1119 (1997).