

광섬유 격자 기술 : 격자 원리 및 응용

이 경 식*, 조 상 연**, 이 종 훈**

(*성균관대 공대 전기전자 및 컴퓨터공학부 부교수, ** 성균관대 공대 대학원)

1. 머리말

광섬유 격자는 광섬유 코어 내에 강한 자외선(UV) 빔의 간섭패턴을 일정한 시간 동안 만들어 줌으로써 쉽게 제작될 수 있는 광섬유소자로서, 광통신 및 광센서 분야에서 앞으로 예상되는 핵심소자이다. 최초로 광섬유 격자가 광섬유 내에서 형성되는 현상은 1978년 캐나다의 통신연구소(CRC)에 근무하는 K. Hill과 그의 동료들에 의해서 발견되었다. 이들은 Ge이 함유된 광섬유에 강한 아르곤 레이저 빔(488nm)을 주입시킨 뒤에 수분 후부터 반사되는 빔이 점점 많아지다가 결국 모든 빔이 반사되는 것을 알았는데, 이것은 입사한 레이저빔이 광섬유 끝에서 반사된 빔과 코어 내에서 중첩되어 격자가 형성되었기 때문이었다. 이 광섬유 격자는 이중광자 과정(two photon process)을 통해서 형성되었으나, 그후에 244nm인 단일광자(single photon)를 통해서 제작되는 경우 훨씬 더 효과적이라는 것이 알려지게 되었다. 1989년 Meltz와 그의 동료들은 훨씬 강한 광섬유 격자가 광섬유 측면에서 두 UV 레이저 빔을 클래딩을 거쳐 직접 코어에 간섭시켜줌으로써 제작될 수 있음을 보여 주었다.

광섬유 격자 소자는 벌크 형태의 같은 기능을 하는 소자에 비해서 전체가 광섬유로 되어 있고, 삽입 손실이 적고, 반사 손실(return loss)이 크며, 가격이 싸다는 장점을 갖고 있다. 또한 굴절을 변화(induced index change), 길이, 격자 주기, apodization 등과 같은 파라미터 값들을 변화시켜줌으로써 원하는 스펙트럼 특성을 쉽게 갖도록 해 줄 수 있는 융통성도 있다.

광섬유가 UV빔에 노출됨으로 인해서 생기는 굴절률 변화에 대한 명확한 해석은 아직도 없지만, 흔히 색중심(color centers)과 관계 있는 것으로 보고 있다. 이외에도 UV빔에 의한 구조재배열(structure rearrangement, densification)도 굴절을 변화에 관여하는 메카니즘으로 보고 있다. 광섬유 코어에 간섭패턴을 형성시켜줌으로써 광섬유 격자를 제작하는 방법에는 위상 마스크를 이용하는 방법, 프리즘 간섭계를 사용하는 방법 등이 있다. 제작되는 광섬유 격자에는 격자 주기에 따라서 단주기격자(short period grating)와 장주기격자(long period grating)로 나뉘어지며, 유효 격자 간

격이 균일한 격자(uniform grating)와 격자간격이 선형적으로 증가 혹은 감소하는 선형처프된 광섬유 격자(linearly chirped grating)가 있다. 이들 광섬유 격자들은 분산보상, 펄스압축, 광섬유증폭기의 이득 평탄, 광섬유레이저, 반도체 레이저의 주파수 안정화, 투과필터, WDM용 add/drop 혹은 drop/pass 필터, 광센서 등 여러 분야에 이용될 수 있다.

다음 절에서 좀 더 자세하게 광감도현상 그리고 여러 가지의 광섬유 격자 제작 방법 및 광섬유 적용 분야에 대해서 고찰해 보기로 하자.

2. 광감도 현상

Ge이 함유된 길이가 짧은 광섬유 끝에 강한 아르곤 레이저빔(488nm)을 주입시키는 실험에서 처음에는 빛이 반사되지 않다가 수분 후부터 반사되는 빔이 증가하여 결국 모든 빔이 반사되는 것은, 입사한 레이저빔이 광섬유 끝에서 반사된 빔과 코어 내에서 중첩되어 간섭패턴과 비슷한 굴절률의 주기적인 변화가 생기게 되기 때문이다. 이러한 현상을 광감도(photosensitivity) 현상이라고 하며 K. Hill에 의해서 1974년에 처음 발견되었다. 광감도는 Ge이 함유되지 않은 여러 종류의 광섬유에서도 관찰되지만, Ge이 함유된 광섬유에서 두드러지기 때문에 아직까지 Ge이 도핑된 광섬유가 주로 광섬유 격자의 재료로 이용되고 있는 실정이다. 광반응에 의해서 생기는 광섬유 격자 내에서의 굴절률 변화는 적절히 열처리를 하는 경우 수명이 25년 이상으로 거의 영구적으로 볼 수 있다. 굴절률 변화의 크기 (Δn)는 노출 시간, 빔의 파장, 빔의 세기와 같은 노출 조건 뿐만 아니라 광섬유코어의 재질 및 조성, 노출 전에 광섬유가 어떻게 처리되어 있느냐에 따라서 달라진다. 현재 광섬유 격자 제작용 광원으로는 주로 펄스 폭이 10ns이고 동작파장이 각각 248nm와 193nm인 KrF 및 ArF 엑시머 레이저가 사용되고 있다. 노출시 빔의 세기는 보통 100-1000mJ/cm²이며 수분이상 노출시킬 때 Ge이 함유된 광섬유에서 10⁻⁵ ~ 10⁻³ 정도의 굴절률 변화가 생긴다. 만일 격자를

제작하기 이전에 광섬유를 수소 처리하는 경우 광감도가 훨씬 개선되어 Δn 이 10^{-2} 에 미치기도 한다.

현재 한가지 물리적인 매카니즘으로는 광감도 현상을 완벽하게 설명할 수 없으며, 여러 가지 매카니즘에 의해서 광섬유가 강한 빛에 노출되는 경우 굴절률이 변하는 것으로 알려져 있다. 특히, Ge이 첨가된 광섬유에서의 굴절률 변화는 GeO결함(defects)의 흡수 피크 파장인 240nm(5.5eV) 근처에서 UV빔에 광섬유가 노출된 뒤에 UV 흡수 스펙트럼이 변화하기 때문인 것으로 보고 있다. 즉, 색중심 모델(color-center model)에 의하면 240nm에서 강한 흡수 특성을 보이는 GeO결함 밴드가 242nm 빛에 노출되는 경우 이 근처의 흡수 스펙트럼은 퇴색(bleaching)되고, 대신 195nm에서 강한 흡수를 갖는 새로운 흡수 스펙트럼이 나타나게 되며, 따라서 Kramers-Kronig 공식에 의해서 굴절률이 변화한다. Ge이 첨가된 광섬유에 수소처리(hydrogen loading)를 하는 경우 코어에 있는 모든 Ge가 수소와 반응하여 Ge 결함 밀도가 크게 증가됨으로써 광감도가 증가한다. 또, 다른 요인으로 강한 빛에 노출되어 유리에 결함이 생기고 따라서 유리구조가 재정렬됨으로써 굴절률이 변화할 수도 있다.

그림 1과 그림 2는 최근에 성균관대학교에서 KrF 엑시머 레이저에서 나오는 빛을 Ge이 함유된 광섬유에 간섭 패턴을 노출시킴으로써 만들어지는 광섬유 격자의 노출시간에 따른 굴절률 변화와 반사파장의 변화를 보여주는 그림들이다. 점선은 실험결과를 나타내고 있고 실선은 색중심 모델을 통해서 예상되는 이론치를 보여 주고 있다. UV 빛의 에너지 밀도는 $252\text{mJ}/\text{cm}^2$ 이고, 펄스 반복률은 5Hz였다.

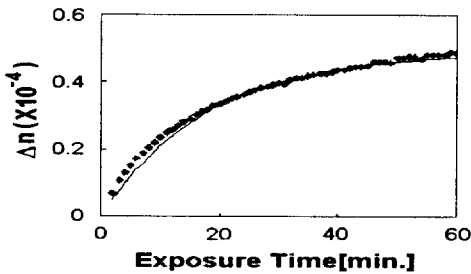


그림 1. UV빔의 노출시간에 따른 광섬유 격자의 굴절률 변화

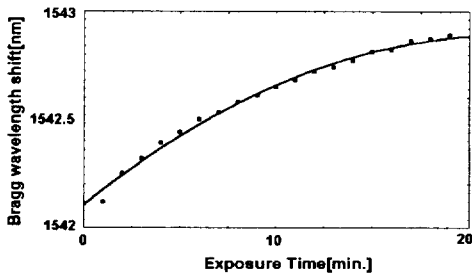


그림 2. UV빔의 노출시간에 따른 광섬유 격자의 중심파장의 이동

3. 광섬유 격자의 제작 방법

3.1. 홀로그래픽 방법(Holographic Method)

홀로그래픽 방법은 1989년 Meltz와 그의 동료들에 의해서 제안된 방법으로 광섬유 측면에서 두 UV 레이저 빔을 클래딩을 거쳐 직접 코어에 간섭시켜줌으로써 광섬유 격자를 제작하는 방법이다.

그림 3은 홀로그래픽 방법으로 광섬유 격자를 제작하기 위한 장치도이다. UV 빔은 광분할기에 입사되어 두 빔으로 나뉘어지고, 분할된 두 빔은 각각 거울에 반사되어 광섬유 측면에 입사되 클래딩을 거쳐 직접 코어에 간섭무늬를 형성하여 광섬유 격자를 만든다. 여기서, 간섭하는 두 빔의 사이각에 따라서 광섬유 격자의 주기가 결정된다. 이런 방법은 제작 시스템이 진동 등에 쉽게 영향을 받아 불안정하고, 높은 가간섭성 UV광원을 필요로 하는 단점이 있다.

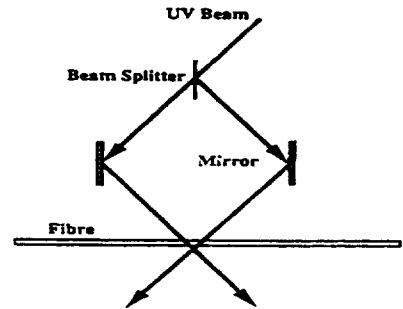


그림 3. 홀로그래픽 방법에 의한 광섬유 격자 제작 장치도.

3.2 프리즘 간섭계 방법(Prism Interferometer Method)

프리즘 간섭계 방법은 홀로그래픽 방법에 제작 시스템의 안정성을 보완하기 위해서 제안된 방법이다.

그림 4는 프리즘 간섭계를 이용하여 광섬유 격자를 제작하기 위한 장치도이다. 격자 제작 원리는 홀로그래픽 방법과 유사하며, 홀로그래픽 방법에 비해서 시스템이 안정되어 있다. 즉, 두 빔의 광경로차가 직각 프리즘 내에서 형성되어 진동 등에 영향을 받지 않는다. 프리즘 간섭계 방법과 홀로그래픽 방법은 여러 가지 단점에도 불구하고 다른 제작방법과 달리 동작과장을 용이하게 조절할 수 있는 중요한 장점이 있다.

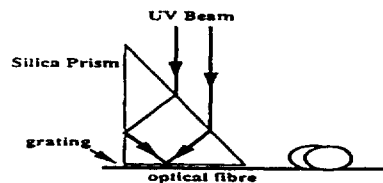


그림 4. 프리즘 간섭계를 이용한 광섬유 격자 제작 장치도.

3.3. 위상 마스크 방법(Phase Mask Method)

위상 마스크 방법은 1993년 캐나다의 Malo와 미국 콜로라도 대학의 D. Anderson 등 여러 연구가들에 의해 제안된 방법으로 여러 제작 방법에 비해서 시스템 구성이 간단하고 안정된 격자를 제작할 수 있으며 대량생산이 가능한 방법이다.

그림 5는 위상 마스크 방법을 이용하여 광섬유 격자를 제작하기 위한 장치도이다. 엑시머 레이저에서 나온 248nm의 UV 빔을 원통 렌즈를 통하여 에너지 밀도를 높이고, 이 빔은 위상 마스크에 의해서 -1, 0, +1차 회절 빔으로 나누어진다. 이때, 대부분의 빔은 -1, +1차 회절빔에 존재하며 이 회절빔은 광섬유 코어에 주기적인 간섭무늬를 형성하여 광섬유 격자를 만든다.

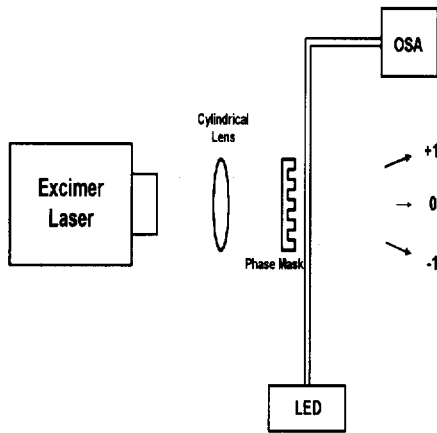


그림 5. 위상 마스크 방법을 이용한 광섬유 격자 제작 장치도

성균관대학교에서 위 광섬유 격자 제작 시스템을 이용하여 만든 광섬유 격자의 투과 스펙트럼 특성은 그림 6과 같다. 제작시 펄스 반복율과 에너지 밀도가 각각 5Hz와 252mJ/cm² 인 엑시머 레이저 빔과 격자 주기 1,060nm이고 길이 2.5cm인 위상 마스크를 이용하여 간섭무늬를 형성하였으며 이에 Ge이 첨가된 광섬유를 약 60분간 노출시켰다. 이때 반사파는 중심파장 λ_B 는 1542.89nm이고 반사율은 94.43%이다.

3.4 이중 노출 방법(Double Exposure Method)

그림 7은 이중 노출 방법을 이용하여 선형 처프된 광섬유 격자를 제작하기 위한 장치도이다. 이 방법은 1994년 캐나다의 CRC에서 연구한 방법으로 2가지 공정을 거쳐 제작된다. 먼저 수소 처리된 광섬유를 놓고 그 위에 마스크를 씌운 후 KrF(249nm) 또는 ArF(193nm) 엑시머 레이저를 조사시킨다. 이때 광섬유 위에 씌운 마스크를 일정한 속도로 움직이게 되는데 이렇게 되면 광섬유의 위치

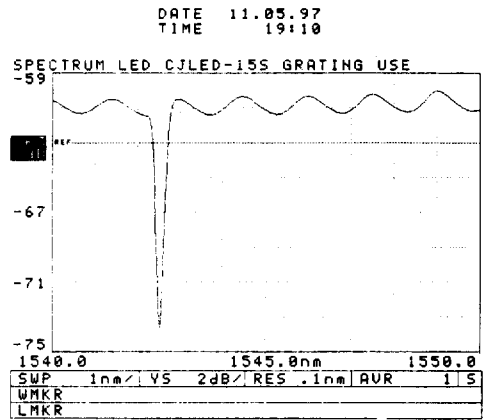
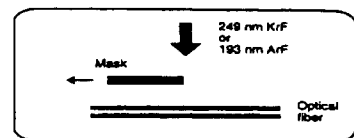


그림 6. 성균관대학교에서 제작된 광섬유 격자의 투과 스펙트럼 특성.

에 따라 엑시머 레이저가 조사된 시간이 달라지게 되고 따라서 위치에 따라 광섬유 코어의 유효 굴절률이 달라지게 된다.

두 번째로 이렇게 굴절률이 위치에 따라 선형적으로 변화되도록 가공된 광섬유 위에 균일한 주기를 갖는 위상 마스크를 씌우고 엑시머 레이저를 조사하여 최종적으로 처프된 광섬유 격자가 제작된다. 이런 제작방법은 공정상 매우 정밀한 조정을 할 수 있기 때문에 재현성은 비교적 좋은 편이나 공정이 여러 단계를 거치므로 제작시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

● Velocity Modulated Exposure Control for Chirping Bragg Grating Resonance



● Zero-Order Nulled Phase Mask Photoimprinting

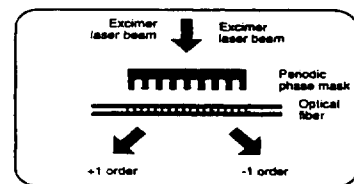


그림 7. 이중 노출 방법을 이용한 선형 처프된 광섬유 격자 제작 장치도.

3.5 광섬유-스캐닝 방법 (The moving fiber-scanning beam technique)

그림 8은 1995년 영국의 Southampton대학교에서 제안한 광섬유-스캐닝 방법을 이용하여 선형 처프된 광섬유 격자

를 제작하기 위한 장치도이다. UV 빔을 스캐닝 거울에 비스듬히 입사시킨 후 반사되어 나온 빔을 위상 마스크를 통과시켜 PZT 스테이지 위에 놓여진 광섬유에 조사한다. 이때 스캐닝 스테이지를 일정속도로 이동시켜 가면서 격자를 형성하게 되고 PZT 스테이지를 컴퓨터로 제어하여 위상 마스크의 속도에 비해서 느린 속도로 이동시켜 준다. 이때 PZT 스테이지는 간단한 프로그래밍을 통해서 속도를 조절할 수 있다. 이런 방법은 비교적 재연성은 좋고 처프 광섬유 격자의 특성도 양호하나, 제작 공정이 비교적 복잡하고 제작에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

Mask with Scanning System

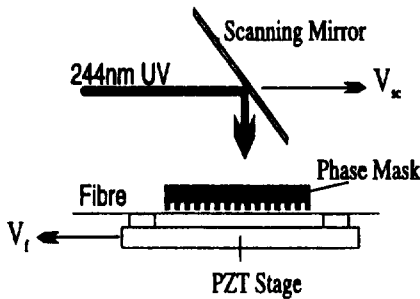


그림 8. 광섬유 스캐닝 방법을 이용한 선형 처프된 광섬유 격자 제작 장치도.

4. 응용분야

4.1. 분산 보상

1987년 F. Ouelte는 선형처프된 광섬유 격자를 이용하여 색분산을 보상하는 방법을 제안하였다. 제안된 분산 보상 방법은, 전송속도가 빠른 파장성분은 처프된 광섬유 격자의 뒷부분에서 반사시키고 전송속도가 느린 파장성분은 앞부분에서 반사시켜줌으로써 빨리 가는 파장 성분과 늦게 가는 파장 성분 사이에 생기는 시간지연을 없애주는 방법이다. 즉, 이렇게 함으로써 실리카 광섬유내 1.3 μ m이상의 파장 영역에서 빠른 성분인 단파장 성분(λ_2)과 느린 성분인 장파장 성분(λ_1)사이에 생기는 속도 차에 의한 색분산 혹은 군속도 분산(GVD)을 없애줄 수 있다.

그림 9는 선형처프된 광섬유 격자를 이용한 분산보상의 원리를 나타낸 것이다.

1996년 영국의 Southampton 대학의 R. I. Laming은 분산의 기울기가 6,000ps/nm이고, 길이가 10cm인 처프된 광섬유 격자를 이용한 분산보상 시스템을 구성하여, 광신호를 10Gbit/s이상의 전송속도로 1.3 μ m용 기존 전송선로를 통해 분산 없이 400km를 전송할 수 있음을 확인하였다. 또한 같은 해 영국 런던대학의 Atkinson은 처프된 광섬유 격자를

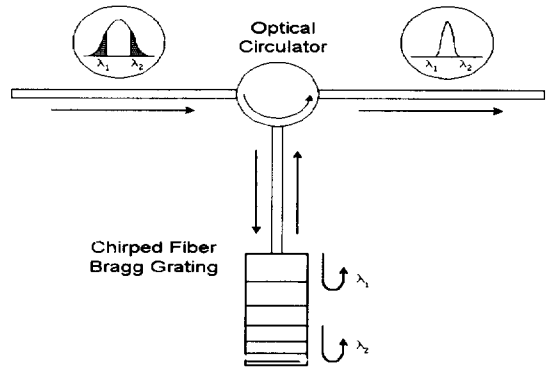


그림 9. 선형처프된 광섬유 격자를 이용한 색분산 보상의 원리

이용한 분산 보상 시스템을 사용하여, 이미 설치된 1.3 μ m용 광섬유를 통해서 600km의 거리를 10Gbit/s의 속도로 분산 없이 전송할 수 있음을 보고하였다.

4.2 광섬유 레이저

광섬유 레이저는 그림 4.2와 같이 어븀(Erbium)과 같은 희토류 금속이 도핑된 광섬유의 양 끝단에 동일한 반사파장을 갖는 광섬유 격자를 연결하여 구성한다. 이때 희토류 금속이 첨가된 광섬유와 두 개의 광섬유 격자는 레이저의 cavity역할을 하게 된다. 이러한 형태의 광섬유 레이저에 대한 연구는 Ball, Morey 그리고 Glenn에 의해서 처음 시도되었다. 반사율이 각각 80%와 72%이고 길이가 1cm인 두 개의 광섬유 격자를 어븀이 도핑된 광섬유에 연결한 후 Ti:Sapphire 레이저를 사용하여 펌핑할 때, 광섬유 격자의 동작파장인 1548nm에서 레이저가 발진하였다. 이때 광섬유 레이저의 출력은 5mW이고, 단일모드로 동작하였다.

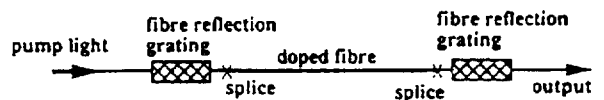


그림 10. 두 개의 광섬유 격자를 이용한 광섬유 레이저

4.3 레이저의 주파수 안정화

1993년 Woodward S. L.에 의해 제시된 광섬유 격자를 이용한 DBR(Distributed Bragg Reflector)레이저의 주파수 안정화 방법을 그림 4.3에 나타내었다.

광섬유 격자를 이용한 DBR레이저의 주파수 안정화 방법에 대해서 살펴보면, DBR레이저 출력 신호의 파장과 광섬유 격자의 동작파장을 서로 비교하여 레이저의 출력파장이 광섬유 격자의 동작파장에서 벗어나면, 그림 11의 궤환 회로를 동작시켜 광섬유 격자의 동작파장과 일치하도록 DBR

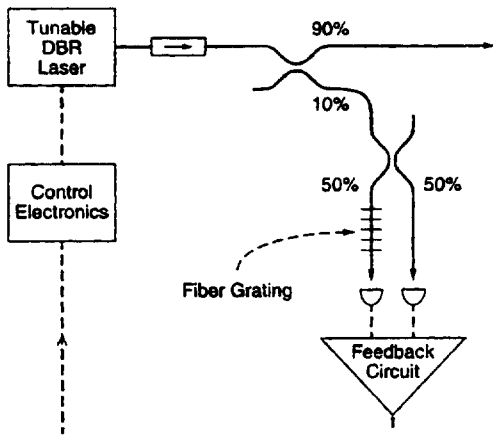


그림 11. 광섬유 격자를 이용한 DBR레이저의 동작파장 안정화 방법.

레이저를 튜닝하게 되는데, 이러한 원리를 이용하여 DBR 레이저의 주파수를 안정화 시켜줄 수 있다.

4.4 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)의 이득 평탄화

EDFA의 이득 스펙트럼(gain spectrum)을 살펴보면, 파장에 따른 이득이 서로 다르기 때문에 파장 분할 다중화 시스템에서 광신호를 송신 또는 수신시에 많은 문제가 발생된다. 따라서 이러한 EDFA의 파장별 이득을 평탄화시키는 방법으로 경사진 광섬유 격자 또는 장주기 광섬유 격자를 사용한다. 이러한 광섬유 격자의 커플링 특성을 살펴보면, 입사되는 광신호중 특정 파장 대역은 클래딩모드로 커플링시키고 나머지 신호성분들은 손실 없이 그대로 투과시키게 되는데, 이러한 특수한 광섬유 격자의 클래딩 모드 성분을 이용하여 EDFA의 이득을 평탄화 시킬 수 있다.

1993년 R. Kashyap에 의해서 발표된 경사진 광섬유 격자를 이용한 EDFA의 이득 평탄화 결과를 그림 12에 나타내었다. 그림에서 보듯이 1550nm대에서 35nm의 대역폭에 걸쳐서 $\pm 0.5\text{dB}$ 내로 평탄화됨을 알 수 있다.

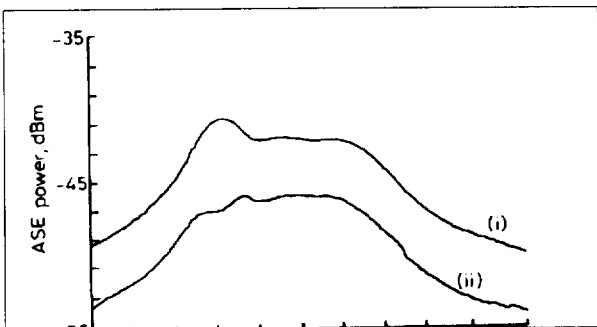


그림 12. EDFA의 ASE 스펙트럼
 ("i":경사진 광섬유 격자를 사용하지 않은 경우, "ii":경사진 광섬유 격자를 사용한 경우)

4.5 대역 필터

광섬유 격자의 반사 특성을 살펴보면, 특정 대역은 반사시키고 다른 파장 대역은 손실 없이 투과시킨다. 이러한 반사 특성을 이용하여 특정 파장 대역만을 투과시키는 대역 필터를 만들 수 있다. 또한 처프된 광섬유 격자나 위상 지연 격자를 이용하여 다양한 투과 특성을 얻을 수 있다. 1997년 영국의 Aston대학의 L. A. Everall와 그의 동료들은 Moiré 필터를 이용하여 대역폭 2nm이내에 4개의 서로 다른 협대역 투과필터를 구현했다.

4.6. Add/Drop 또는 Drop/Pass필터

Add/Drop필터는 파장분할 다중화 시스템에서 특정 파장의 신호를 추출해 내거나 또는 더하는 역할을 한다. 이러한 Add/Drop필터는 광 회전기(optical circulator)와 광섬유 격자를 이용하여 구현할 수 있으며, 또한 Mach-Zehnder 간섭계와 광섬유 격자를 이용하여 구현할 수 있다.

그림 13과 14는 광섬유 Add/Drop필터의 구성과 동작 특성을 나타낸 그림이다. 그림 13은 광섬유 Add/Drop필터로서 Mach-Zehnder간섭계의 양쪽경로에 반사파장이 λ_1 인 동일한 광섬유 격자를 형성시킨 시스템이다. 이때 양쪽 경로에 형성된 광섬유 격자의 위치 및 특성은 동일하다고 가정한다. 그림에서 보듯이 광섬유 Add/Drop필터의 입력 단으로 여러 파장으로 이루어진 신호가 들어오게 되면 입력 신호는 3dB 방향성 결합기에 의해서 Mach-Zehnder간섭계의 양쪽경로로 신호가 나뉘어져 진행하게 된다. 양쪽으로 나뉘어져 진행해 나가는 신호는 3dB 방향성 결합기의 특성에 의해 양쪽경로 간에 $\pi/2$ 만큼의 위상차를 가지고 진행하여 양쪽경로에 형성되어 있는 광섬유 격자를 통과하게 되는데 이때 양쪽 경로를 지나는 신호들 중에서 광섬유 격자의 반사중심파장 λ_1 는 광섬유 격자에 의해 반사되어 Tap 단자 쪽으로 반사되어 나가게 되고 나머지 신호들은 광섬유 격자를 통하여 다음 번 3dB 방향성 결합기로 진행하여 output단자로 빠져나가게 된다.

그림 14는 특정파장의 신호를 더하는 기능을 나타내고 있다. 앞에서와 마찬가지로 입력단으로 여러 파장의 신호가 들어오고 이번에는 더하고자 하는 파장의 신호를 Add단자로 입력시키게 된다. 입력단으로 들어온 신호는 3dB 방향성 결합기를 거쳐 양쪽경로로 나뉘어져 진행하며 광섬유 격자를 투과하고 다음 단의 3dB 방향성 결합기를 통과하여 output단자로 반사되어 나가게 된다. 결국 입력단자로 들어온 신호와 Add단자로 들어온 신호가 모두 output단자로 나오게 되므로 두 신호가 더해지는 기능을 하는 것이다.

1995년 캐나다의 F. Bilodeau와 그의 동료들에 의해서 Mach-Zehnder간섭계와 광섬유 격자를 이용한 Add/Drop필터를 최초로 발표하였다. 이때 동작파장 1549.1nm에서 Add/Drop 효율은 99.4%였다. 이 외에도 광섬유 격자를 이용하여 수신된 신호를 모두 다음노드로 통과시키거나 수신된 신호중 특정파장의 신호성분만을 추출해 낼 수 있는 Drop/Pass필터를 성균관대학교 본 연구팀에 의해서 구현한 바 있다.

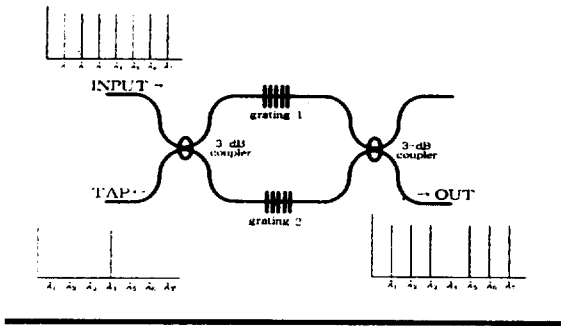


그림 13. Add/Drop필터의 drop동작

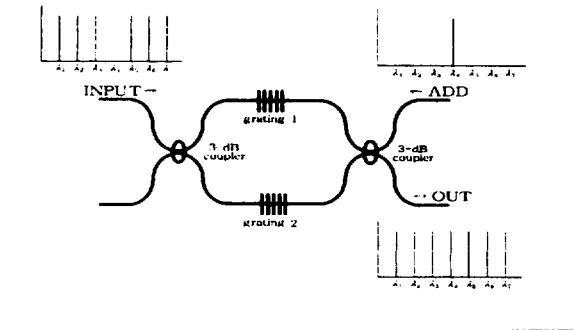


그림 14. Add/Drop필터의 add동작

4.7 광섬유 센서

광섬유 격자에 온도나 스트레인이 가해지면 가해진 온도나 스트레인에 따라 광섬유 격자의 동작 파장이 이동하게 된다. 이러한 광섬유 격자의 동작특성을 이용하여 온도, 스트레인뿐만 아니라 전류, 전압 등을 측정할 수 있다. 광섬유 격자를 이용한 센서는 외부에서 가해진 물리량에 선형적이며 절대적인 응답특성을 보이며, 삽입손실이 적다는 장점이 있다.

광섬유 격자를 이용한 센서의 예들로는, 1997년에 V. Bhatia와 그의 동료들에 의해 온도 민감성을 낮춘 장주기격자(Long Period Grating)를 사용하여 스트레인을 측정하는 광섬유 센서가 발표되었다. 측정결과 가해진 스트레인 양에 따라 $-21.44\text{nm}/\% \epsilon$ 의 비율로 장주기격자의 중심파장이 이동하는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 해 일본 Fujikura사의 M. Sudo에 의해서 PANDA 광섬유에 광섬유 격자를 제작하여 온도와 스트레인을 동시에 측정할 수 있는 광섬유 센서가 개발되었다. 이 광섬유 센서를 이용하여 온도와 스트레인이 각각 $\pm 2^\circ\text{C}$ 와 $\pm 20 \mu \epsilon$ 의 오차범위 내에서 측정이 가능하였다. 그리고 같은 해 P. Ferdinand는 광섬유 격자를 이용한 신장계(extensometer)를 건물이나 교량 등에 부착하여 콘크리트의 상태를 실시간으로 측정하였으며 신장계의 측정범위는 $2 \mu \epsilon \sim 2,000 \mu \epsilon$ 였다.

5. 결론

광섬유 격자의 형성 원리, 제작 방법, 광섬유 격자의 응용 분야에 대해서 살펴보았다. 앞으로 광섬유 격자의 형성 원리에 대한 좀 더 완벽한 모델이 나올 것으로 기대되며, 광감도를 개선시키기 위해서 여러 종류의 광섬유와 수소처리 및 열처리와 같은 처리 방법들이 연구될 것이다. 또한 새로운 광섬유 격자와 함께 새로운 광섬유 격자 소자들이 개발되어 광통신 및 광센서 분야에 많이 적용될 것이다.

참고 문헌

- [1] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1263-1276, 1997.
- [2] R. Kashyap, "Photosensitive Optical fibers: Device and Applications," *Optical fiber technology 1*, pp. 17-34, 1994.
- [3] 임 종훈, 조 상연, 김 상엽, 박 광노, 이 종훈, 박 봉욱, 송 정태, 이 경식, 전 찬오, "UV beam parameter가 광섬유 격자 형성에 미치는 영향," *KIEE '97*, 1997.
- [4] S. Y. Cho, J. H. Lim, Y. T. Lee, K. S. Lee, Y. H. Won, "Characteristics of all-fiber tunable drop/pass filter," *OECC'97*, 9EP-11, pp. 300-301, 1997.
- [5] 박 광노, 조 상연, 이 영탁, 이 경식, 원 용협, "파장 가변 가능한 광섬유 Drop/Pass필터의 특성 분석," *전자공학회논문지*, Vol. 34, No. 8, 1997.
- [6] K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo, T. Kitagawa, S. Theriault, D. C. Johnson, and Albert, "Chirped in-fiber Bragg grating for compensation of optical 1-fiber dispersion," *Optics Letters*, Vol. 19, No. 17, 1994.
- [7] M. Sudo, M. Nakai, K. Himeno, S. Suzuki, A. Wada, R. Yamauchi, "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain using PANDA Fiber Grating," *Conference Proceedings of OFS-12*, paper OWC7, 1997.
- [8] R. I. Laming, N. Robinson, P. L. Scrivener, S. Barcelos, M. N. Zervas, "A dispersion tunable grating in a 10Gbit/s 100-220km step index fibre link", *ECOC'95*, 1995.
- [9] G. P. Agrawal, and S. Radic, "Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings and their Application for Wavelength Demultiplexing," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.5, No.1, 1993.
- [10] H. Patrick and S. L. Gilbert, "Growth of Bragg

- gratings produced by continuous-wave ultraviolet light in optical fiber," *Optics Letters*, Vol. 18, No. 18, pp. 1484, 1993.
- [11] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method," *Optics Letters*, Vol. 14, No. 15, pp. 823, 1993.
- [12] R. Kashyap, J. R. Armitage, R. Wyatt, "All-fiber narrowband reflection gratings at 1550nm," *Electronic Letters*, Vol. 26, No. 11, pp. 730, 1990.
- [13] F. Ouellette, K. O. Hill, and D. C. Johnson, "Enhancement of second-harmonic generation in optical fibers by hydrogen heat treatment," *Applied Physics Letters*, Vol. 54 pp. 1086, 1989.
- [14] D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, and A. E. White, "Phase mask method for volume manufacturing of fiber phase gratings," *In Proceeding Conference on Optical Fiber Communication, OFC '93*, Technical Digest, pp. 68, PD16, 1993.
- [15] G. A. Ball, W. W. Morey, and J. P. Waters, "Nd³⁺ fiber laser utilizing intra-core Bragg reflectors," *Electronic Letters*, Vol. 26, No. 21, pp. 1829, 1990.
- [16] K. C. Byron, K. Sugden, T. Bircheno, and I. Bennion, "Fabrication of chirped Bragg gratings in photosensitive fibre," *Electronic Letters*, Vol. 29, No. 18, pp. 1659, 1993.
- [17] F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo, D. C. Johnson, and J. Albert, "High-return-loss narrowband all-fiber bandpass Bragg transmission filters," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 6, pp. 80-82, 1994.
- [18] F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault, B. Malo, J. Albert, and K. O. Hill, "An all-fiber dense-wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 7, pp. 388-390, 1995.
- [19] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Applied Physics Letters*, Vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- [20] G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, and J. D. Farina, "In-fiber Bragg-grating sensors," *in Proceeding OFS'88*, 1988.
- [21] K. N. Park, Y. T. Lee, M. H. Kim, K. S. Lee, Y. H. Won, "All-fiber drop-pass filters with fiber Bragg gratings." accepted subject to revisions, *IEEE Photonics Technology Letters*.



이경식(李景植)

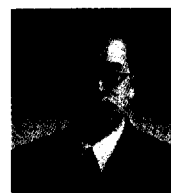
1955년 2월 22일생. 1979년 성균관대 공대 전자공학과 졸업. 1978년 12월~1980년 8월 한국통신기술연구소(현 전자통신연구소)근무. 1982년 University of Colorado(Boulder)대 석사. 1985년 8월 University of Colorado

대 박사학위 취득. (Electrical Engineering dept.). 1985년 9월~1986년 8월 University of Colorado대 연구원. 1986년 9월~1988년 7월 미국립표준연구소(NIST) 근무. 1988년 7월~1990년 2월 미 TACAN Corp. 근무. 1990년 3월~1994년 3월 성균관대 공대 전자공학과 부교수. 관심분야 : 광통신, 광센서, photonic devices 등.



조상연(趙祥衍)

1973년 11월 27일생. 1996년 2월 성균관대 공대 전자공학과 졸업. 1996년 3월~현재 동 대학원 전자공학과 재학중. 관심분야: 광통신, 광전자, 광센서.



이종훈(李鍾勳)

1974년 1월 18일생. 1996년 2월 성균관대 전자공학과 졸업. 1996년 3월~현재 동 대학원 전자공학과 재학중. 관심분야: 광센서, 광통신, 광전자.