

Thema

| 광민감성 광섬유를 이용한 광섬유 격자 소자

한 영근 선임연구원
(한국과학기술연구원 광기술연구센터)

오 경환 교수
(광주과학기술원 정보통신공학과)

1. 서론

1960년대 중반부터 개발되기 시작한 광통신 기술은 광섬유와 빛을 이용한 통신기술로써 30여년의 짧은 역사에도 불구하고 많은 발명과 기술 혁신을 거듭하고 있다. 특히 인터넷의 보급과 함께 고화질 및 양방향 TV, VOD 방송, 화상 전화 등의 멀티미디어 시대가 열리면서 대용량의 데이터 전송이 요구됨에 따라 가장 경제적이고 효율적인 고속 전송 수단으로 광통신에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다. 따라서 초고속 광통신 구현을 위해서는 여러 가지 핵심기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면 여러 개의 각 채널을 모두 동등한 수준으로 증폭시킬 수 있는 이득이 크고 평탄한 광증폭기, 주어진 대역폭 내에서 채널의 수를 증가시키기 위한 다파장 광원, 넓은 대역폭 내에서 손실이 적은 다중화기 및 역다중화, 그리고 각 채널을 신호간섭 없이 분리해낼 수 있는 광필터 등이 핵심 광소자로서 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 핵심 광소자 구현에 많은 효율성을 가지는 소자가 광섬유 격자 소자이다. 광섬유 격자 소자는 필터로써의 기능뿐만 아니라 분산 보상기, 광원용 공진기, 펄스 제어기, 광스위치 등 다양한 활용성으로 인해 많은 연구가 진행되고 있는 분야이다. 광섬유 격자는 광섬유 코어의 굴절률을 축방향으로 주기적으로 변화시킴으로써 생성이 되는데 근래에 와서 통신망의 광화와 더불어 중요한 소자로 부각되고 있다[1]. 본 글에서는 광민감성 광섬유를 이용한 광섬유 격자 소자에 대해 논의하도록 하겠다. 광섬유 격자 소자의 기본 원리, 종류 및 제조 방법, 광민감성에 대해 설명할 것이다. 광섬유 격자를 이용하여 광소자 및 센서로의 활용에 대해서도 기술하고자 한다.

2. 광섬유 격자의 원리 및 광민감성

광섬유 격자는 광섬유 내에 굴절률의 주기적인 변화를 유도하여 광신호의 특성을 변화시키는 광소자이다. 광섬유 격자의 특성을 결정하는 중요한 요소인 광민감성 (Photosensitivity)이란 게르마늄 (Ge)이 첨가된 광섬유에 UV 레이저를 조사하면 굴절률이 상승하는 현상을 일컫는다[1].

광섬유에 게르마늄을 첨가하면 240-250 nm 근방에서의 강한 흡수 영역을 가지게 되므로 240-250 nm의 강한 UV를 조사하게 되면 굴절률의 변화가 일어나며 240-250 nm 근방에서의 강한 흡수 밴드가 소멸되어 버린다. 이러한 흡수의 변화는 Kramers - Kronig 관계식에 의해서 유도되는 굴절률의 변화를 예측할 수 있다[2].

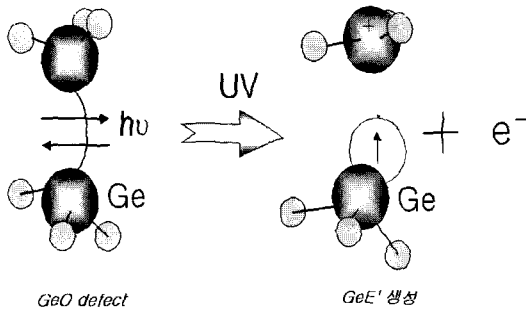


그림 1. UV 레이저에 GeO2 결합이 깨서 형성된 GeE'.

광민감성의 원인은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않고 있으며 다양한 이론을 통해서 해석하려는 연구가 진행되어 오고 있다. 일반적으로 광민감성에 대한 기본 원리는 다음과 같다(그림1). Ge는 실리카 유리에 Ge⁴⁺로 들어가며 산화반응에 의해 GeO₂를 형성한다. 그러나 GeO₂가 GeO와 O₂로 분해되면서 산소가 없는 (oxygen-vacancy defect) Ge²⁺가 광섬유 안에서 defect로 작용하게 되어 240-250 nm에서 강한 흡수밴드를 나타낸다. Ge²⁺의 농도는 Ge첨가 농도가 클수록 많아진다. Ge가 첨가된 광섬유 안에서의 defect에 의한 강한 흡수밴드는 240-250 nm 근방의 강한 UV 빛을 조사하게 되면 없어지게 된다. 이것의 원인중의 하나는 Ge(E')에 의한 것으로서, 그림 1에서와 같이 Ge(E')은 외부에서 임계치 이상의 240 nm 근방의 UV 레이저를 조사하면 Ge²⁺가 끊어지게 되어 일어나는 현상으로 설명할 수 있다. 하지만 광민감성을 정확하게 해석할 수 있는 이론은 아직 없으며 여러 현상이 복합적으로 일어나는 것으로 생각되어지고 있다.

광섬유 격자에서는 광민감성이 높을수록 고성능 광섬유 격자가 제조 가능하기 때문에 이를 높이기

위한 많은 연구가 진행되어왔다. 광민감성을 높이는 방법에는 (1)격자 제조용 광섬유의 코어 부분에 GeO₂, P₂O₅, Al₂O₃, B₂O₃, Sn 등 다양한 물질을 첨가함으로써 광민감성을 증가시키는 방법, (2)193 nm, 157 nm 등의 UV 레이저를 이용하는 방법, (3) 스트레인을 이용하는 방법, (4) 수소 처리 방법 등이 연구되어 보고되었다 [3]. 일반 광섬유의 광민감성을 증가시키기 위해 사용하는 방법은 일반적으로 수소 처리 방법으로 100 bar, 100 ℃의 고압 고온 상태에서 수소가 광섬유 내로 광섬유를 침투시켜 광민감성을 증가할 수 있다. 그러나 격자 제조 후 반응하지 않은 수소를 제거하여 격자의 특성을 안정화하기 위한 annealing 과정이 필요하므로 격자의 특성이 변하는 단점이 있다. 최근에는 게르마늄(Ge)과 붕소(B)를 함께 첨가한 광민감성 광섬유가 개발되어 상품화되고 있는게 일반 광섬유에 비해 가격이 비싸다는 단점이 있다.

3. 광섬유 격자의 종류와 제조 방법

광섬유 격자는 굴절률 변화의 주기의 크기에 따라 단주기 격자 (Fiber Bragg grating (FBG))와 장주기 격자 (Long-period fiber grating (LPFG))의 두 가지 종류로 나누어진다. 단주기 격자는 반대 방향으로 진행되는 코어 모드들끼리의 상호 작용에 의한 커플링에 기반을 두고 있으며 브래그(Bragg) 공진 조건을 만족하는 파장대의 광은 격자를 통과하지 못하고 반사하게 된다. 또한 굴절률의 변화 주기가 매우 짧으며 1.55 μm의 경우 주기는 대략 0.5 μm 정도이다. 단주기 격자는 일반적으로 광민감성을 기반으로 광섬유 코어를 자외선에 노출시킴으로써 제조한다. 단주기 격자를 제조하는 방법은 그림 2에서 보는 바와 같이 (1) Dual-beam holographic method, (2) phase-mask photo-lithographic method, (3) Point-by-point fabrication method 등으로 요약할 수 있다 [4]. 이 제조 방법들은 각기 장단점이 있으며 일반적으로 가장 널리 사용되는 제조 방법은 위상 마스크 (Phase Mask)에 의한 방법으로 가격이 비싸고 격자 주기가 고정된다는 단점이 있으나 안정된 성능과 생산성이 높아서 국내외적으로 보편적으로 이용되고

있다. Dual-beam holographic method는 위상 마스크에 의한 방법보다는 굴절률 변화의 주기를 유연성 있게 변화시킬 수 있다는 장점이 있어서 최근 많은 연구가 이뤄지고 있다.

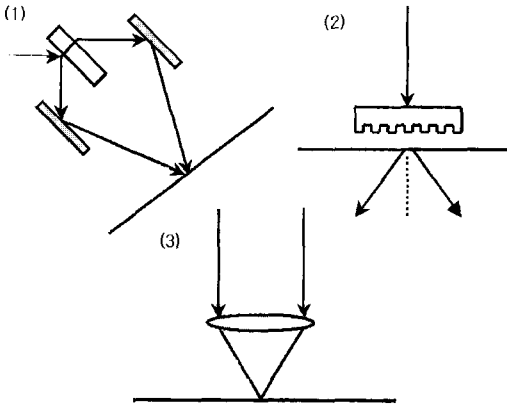


그림 2. 단주기 광섬유 격자 제조 방법.

단주기 광섬유 격자의 경우에는 UV 레이저 조사 양(Fluence)과 수소처리 유무에 따라 격자 특성이 달라진다. 수소처리를 하지 않은 광섬유를 UV 레이저에 노출하여 광섬유 격자를 제조하면 초기에는 UV 조사양에 따라 반사율이 증가하는 type I 격자가 형성되고 중심 파장은 장파장으로 움직인다. 이것은 UV 조사양에 따라 굴절률 변화가 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 하지만 시간에 따라 UV 조사양이 증가하면 격자가 오히려 지워져서 반사율이 감소하다가 거의 사라지며 공진 파장은 장파장으로 움직이는데 이것은 일정 시간 이후에 UV 조사에 의해 오히려 격자가 지워지는 효과가 나타남을 의미한다. 그리고 이후 UV 조사량을 더 증가시키면 반사율이 다시 증가하는데 이때 공진 파장은 단파장으로 움직이는 type IIa 격자가 형성되는데 이것은 굴절률의 변화가 감소하는 negative index 변화가 유도되기 때문이다. 수소처리를 한 광섬유를 UV 레이저에 노출하면 앞서 언급한 바와 비슷한 과정으로 반사 특성을 보이는데 Type IIa 격자와는 달리 공진 파장이 지속적으로 장파장으로 움직이는 Type IA 격자가 형성된다[5].

장주기 격자의 경우는 그 작용 원리가 단주기 격

자와는 달리 광섬유내의 코어 모드와 클래딩 모드의 상호 작용에 의한 커플링에 기본을 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. 장주기 격자를 제조하는 방법에는 (1) 광민감성에 기반을 둔 Amplitude mask method, (2) 외부 클래딩 변형 (Surface Deformation or etching)에 의한 Point-by-point fabrication method, (3) CO₂ 레이저나 arc discharge 등 열에 의한 스트레스 방출 (Thermal Stress Release)에 의한 Point-by-point fabrication method, (4) Acousto optic 효과나 V-groove를 이용한 주기적 미세 구부림 현상에 의한 방법 등이 있다[6].

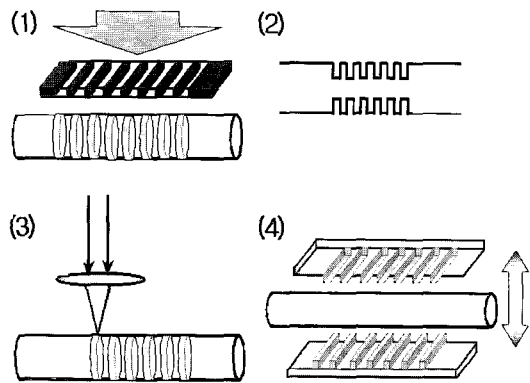


그림 3. 장주기 격자 제조 방법.

장주기 광섬유 격자의 특성은 코어 모드와 클래딩 모드 사이의 초기 커플링 세기에 따라 특성이 변한다[7]. UV 광민감성에 의한 굴절률 변화는 그림 4에서 보는 바와 같이 AC 부분과 DC 부분으로 구성된다. 격자 생성시, 커플링 상수에 직접적으로 관련되어 투과도 변화에 영향을 주는 것은 AC 부분이고, 공진 파장의 장파장 이동에 영향을 주는 것은 DC 부분이다. 따라서 장주기 격자 생성시, 광민감도에 의

한 굴절률 변화의 AC 부분과 DC 부분이 모두 증가하기 때문에, 투과 손실이 증가하고, 공진 파장도 장파장으로 이동하게 된다. 하지만, 광민감도에 의한 굴절률 변화 비율이 UV 노출량에 대해 감소한다. 따라서 격자 부분을 UV 노출하게 되면, AC 부분은 점차 감소하게 되어 커플링 상수가 감소하게 되고, DC 부분을 지속적으로 증가하여, 공진 파장이 장파장으로 이동하게 된다. 커플링 상수의 변화는 투과도의 변화를 일으킨다. 장주기 격자에서는 투과도가 $\cos^2(kL)$ 변화하기 때문에, 초기 커플링 세기가 달라진다. 초기 커플링 세기가 불포화된 장주기 격자에 대해서는 UV 노출로 인해 감소된 커플링 상수에 의해 투과 손실이 감소하게 된다. 하지만, 초기 커플링 세기가 포화된 장주기 격자에 대해서는 감소된 커플링 상수가 오히려 투과 손실의 증가를 유도한다.

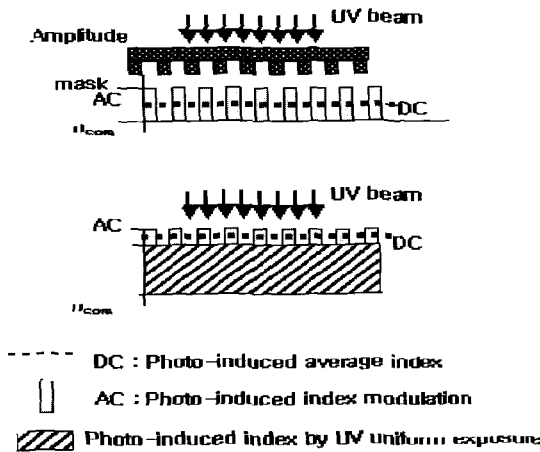


그림 4. UV 레이저에 의한 굴절률 변화.

그림 5와 6에서는 커플링 세기의 포화 여부에 따라 장주기 격자의 UV 노출 효과를 나타내고 있다. 초기 커플링 세기가 불포화된 장주기 격자의 경우는 UV 노출에 의해 감소된 AC 부분이 커플링 상수를 감소시키고, 투과 손실도 감소시킨다. 하지만, 초기 커플링 세기가 포화된 장주기 격자의 경우는 감소된 커플링 상수는 오히려 투과 손실을 증가시킨다. 공진 파장은 UV 노출이 DC 부분을 증가시키므로, 두

경우 모두 장파장으로 이동했다. 실험에서 사용한 광섬유는 붕소와 게르마늄 함께 첨가하여 제작하였고, Δ 는 0.1%, 클래딩 반지름은 120 μm 였다. 장주기 격자의 주기는 400 μm , 길이는 2 cm였다. UV 엑시머 레이저의 펄스당 에너지는 140 mJ 이었다.

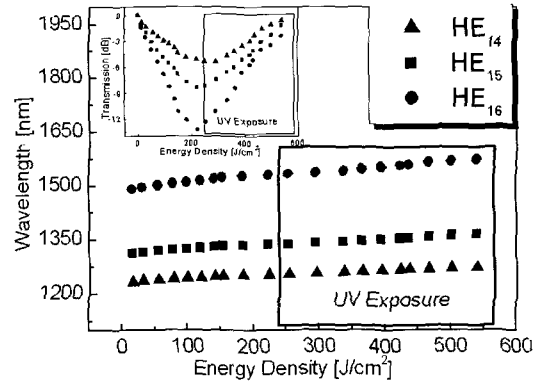


그림 5. 초기 커플링 세기가 불포화된 장주기 격자에 대한 UV 노출 효과.

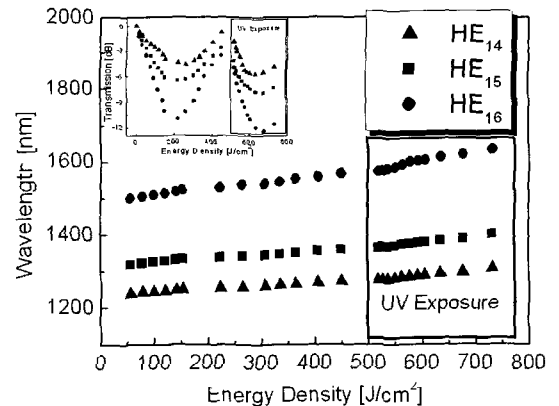


그림 6. 초기 커플링 세기가 포화된 장주기 격자에 대한 UV 노출 효과.

4. 광섬유 격자의 활용

현재 연구되고 있는 광섬유 격자의 응용 가능성은 매우 다양하여 크게 나누어 광통신, 광센서, 광메모리 및 집적 광학 등으로 분류할 수 있다. 단주기 격

자의 경우 현대역 투과/반사 필터, 현대역 피드백을 이용한 레이저 파동 안정화, 분산 보상, WDM용 Add/Drop MUX/DEMUX, 라만 증폭을 이용한 1.3 μm 파장 증폭, 파장 가변 광섬유 레이저, 통신용 접속 및 연결 소자 등에 응용 될 수 있으며 장주기 격자의 경우는 어븀 광증폭기의 이득 평탄화 필터, 다파장 필터, 광센서에의 응용 등에 응용하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 그림 7은 광섬유 격자를 이용한 라만 레이저에 대한 구성도를 나타낸다[8]. 라만 레이저는 50 km 단일 광섬유, 공진기를 구성하기 위한 미러 용으로 사용된 가변 칩 광섬유 격자, 센서 헤더로 사용된 두 개의 단주기 광섬유 격자로 구성되었다. 0.2nm의 대역폭을 가진 단주기 FBG 1, 2의 중심 파장은 각각 1554.2와 1556.7 nm 이고, 반사율은 약 99.9%이다. 사용된 라만 펌프는 4개로써, 각 중심 파장은 1425, 1435, 1455, 1465 nm 이고, 총 파워는 1 W이다.

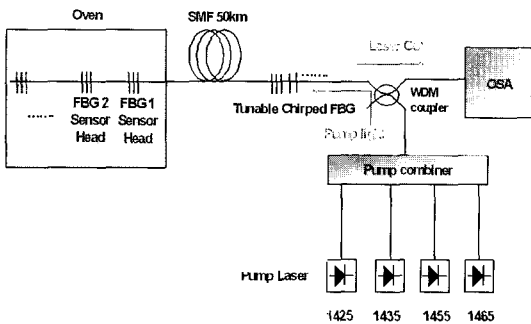


그림 7. 단주기 광섬유 격자를 이용한 라만 레이저 구성도.

그림 8은 실험에서 사용한 단주기 광섬유 격자의 반사 스펙트럼을 나타내고 있다. 두 개의 단주기 격자 (FBG1, 2)들을 단일 광섬유에 직렬로 부착시켰고, 온도 민감도 측정을 위하여 오븐을 이용하여 가열시켰다. 가변 칩 광섬유 격자 (Chirped Fiber Bragg Grating)는 금속판의 구부림 각도를 조절하여 대역폭을 변화시킬 수 있다.

그림 9는 라만 레이저의 출력 스펙트럼을 나타내고 있다. 두 개의 다른 중심파장을 가진 레이저 출력을 얻을 수 있었으며, SNR은 50dB 이상이다. 온도

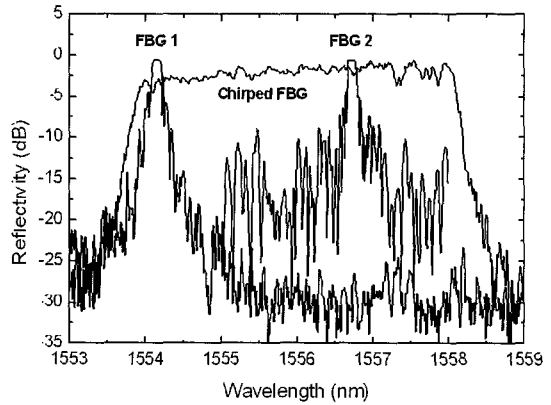


그림 8. 단주기 격자의 반사 스펙트럼.

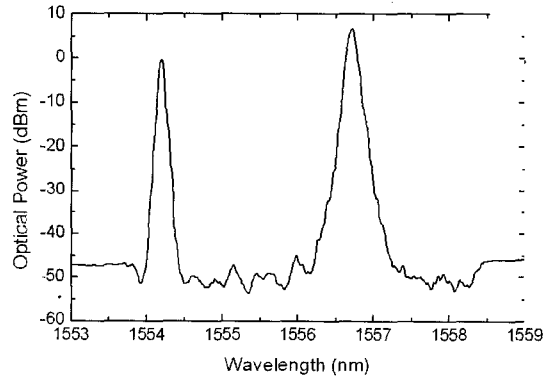


그림 9. 상온에서의 라만 레이저 출력 스펙트럼.

변화에 따른 라만 레이저의 출력 변화를 측정하기 위해 30 ~ 100℃ 영역에서 FBG1의 온도를 변화시켜 라만 레이저의 출력 중심 파장의 변화를 관찰하였다. 그림 10은 FBG1의 온도 변화에 대해 라만 레이저의 출력 파장 변화를 측정한 결과이다. 중심파장의 선형적 변화가 온도변화에 따라 명확하게 나타남을 확인할 수 있으며, 온도 민감도는 7.15 pm/℃로 분석되었다.

장주기 격자 두 개를 직렬 연결하면 클래딩 모드 상호 작용에 의해서 그림 11에서 보는바와 같이 다파장 필터 특성을 갖는 다채널 필터를 제조할 수 있다[9]. 특히 그 특성은 물리적 변수(예: 격자 사이 길이, 격자 길이, 격자 개수)에 의해 조절될 수 있다. 그림 11에서 보는 바와 같이 채널 간격은 격자 사이 길이가 증가함에 따라 감소한다. 채널수는 격자 길

이가 감소함에 따라 증가한다. 대역폭은 격자 개수가 증가함에 따라 감소한다. 손실 크기는 격자 개수가 증가함에 따라 증가한다. 따라서 목적에 따라, 다채널 장주기 격자의 소자로서의 특성을 쉽게 조절할 수 있다.

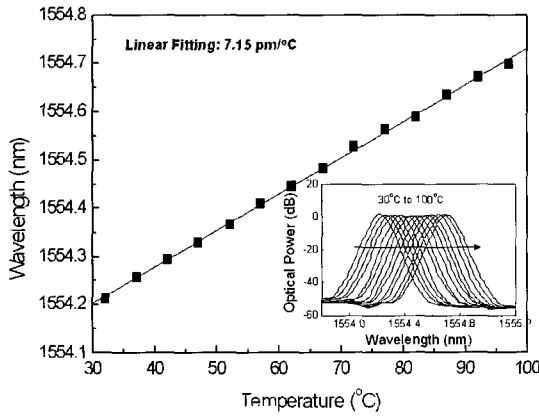


그림 10. 온도 변화에 따른 레이저 중심 파장 변화.

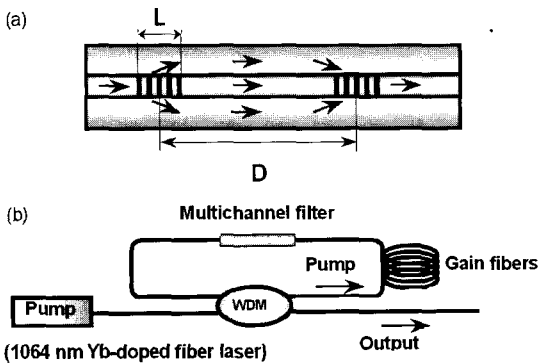


그림 11. (a) 장주기 격자의 직렬연결에 의한 다채널 필터 형성의 기본 원리, (b) 장주기 격자 기반 다채널 필터를 이용한 다파장 라만 레이저의 구성도.

그림 12는 장주기 격자 기반의 다채널 필터를 이용하여 다파장 라만 레이저에 대한 구성도를 나타내고 있다[10]. 고리형 공진기는 WDM 커플러, 4 km 라만 이득 광섬유 (높은 비선형 광섬유(Highly Nonlinear Fiber)나 분산 천이 광섬유(Dispersion Shifted Fiber)), 그리고 다채널 장주기 필터로 구성된

다. 그리고 최대 출력 파워가 20W인 1064 nm 이터븀 첨가 광섬유 레이저를 펌프 광원으로 사용하였다.

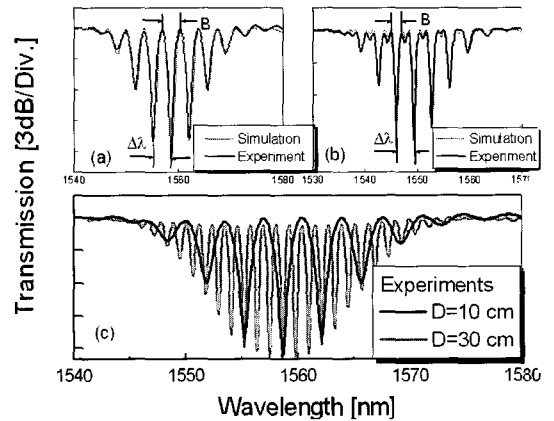


그림 12. 장주기 격자 기반 다채널 필터의 투과 특성.

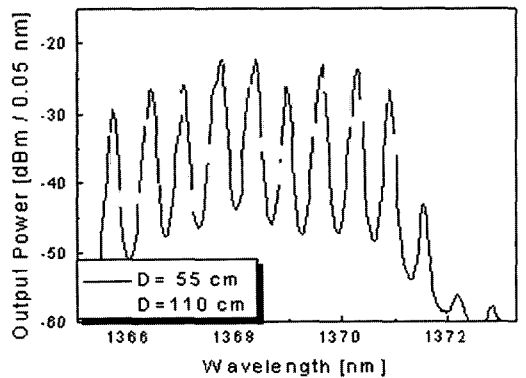


그림 13. 다파장 라만 레이저의 출력 특성.

그림 13은 펌프 파워가 5 W이고 4 km DSF를 사용하여 E-band용 다파장 라만 레이저 광원을 구현한 실험 결과를 나타내고 있다. 특히 장주기 격자 사이의 길이에 따라서 다파장 라만 레이저의 출력 특성이 효과적으로 조절됨을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 장주기 격자 사이의 길이가 55cm 인 경우에는 채널수는 9개였고, 파장 간격은 100 GHz (~ 0.66 nm)이었으며, 격자 간격이 110 cm 인 경우에는 채널수가 19 개였고, 파장 간격은 50 GHz (~ 0.33 nm)이었다.

5. 결론

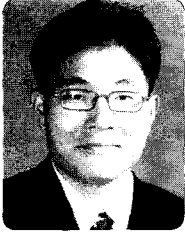
인터넷의 보급과 더불어 핸드폰 및 PDA, 고화질 방송 등 소비자에게 필요한 데이터양이 급증함에 따라 초고속 광대역 통신 구현의 필요성이 대두되고 있다. 현재 이러한 사회의 요구에 부응하기 위해 기간 통신망으로 광통신이 이용되고 있으며, 광통신의 고속화와 대용량화를 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 전세계적으로 40Gb/s 이상 초고속 광통신 시장에서 기술적 우위를 확보하고 시장 경쟁력을 강화하기 위해 많은 투자와 연구를 하고 있다. 최근 광통신 시장이 어려움을 많이 겪고 있으나 선진국에서는 여전히 초고속 광통신 시스템 및 광소자 연구에 많은 연구를 진행하고 있다. 초고속 광대역 통신을 구현하기 위해 필수적인 광섬유 격자 소자는 광섬유 증폭기, 분산 보상기, 신호 가감기, 신호 필터 등 다양한 활용성을 가지고 있다. 또한 구조물의 안전도 검사를 위한 센서로써 많은 연구가 진행되고 있다. 고층 건물, 교량 및 선박 등 날씨와 환경 변화에 따른 구조물의 변화를 감시하기 위해 광섬유 격자 기반의 고정밀 센서 시스템에 대한 연구도 많은 주목을 받기 시작했으며 상용화를 위해 노력하고 있다. 따라서 전세계적으로 광섬유 격자 소자 및 활용에 대한 많은 연구가 진행되었고 많은 결과가 보고되고 있으며 앞으로도 다양한 연구가 진행될 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [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, p. 647, 1978.
- [2] Kelly D. Simmons, Sophie LaRoche, Victor Mizrahi, George I. Stegeman, David L. Griscom, "Correlation of defect centers with a wavelength-dependent photosensitive response in germania-doped silica optical fibers," *Opt. Lett.*, vol. 16, p. 141, 1991.
- [3] D. L. Williams, B. J. Ainslie, J. R. Armitage, R. Kashyap, R. Campbel, "Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres," *Electron. Lett.*, vol. 29, p. 45, 1993.
- [4] 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.*, vol. 62, p. 1035, 1993.
- [5] Y. Liu, J. A. R. Williams, L. Zhang, and I. Bennion, "Abnormal spectral evolution of fiber Bragg gratings in hydrogenated fibers," *Opt. Lett.*, vol. 27, p. 286, 2002.
- [6] Y. G. Han, H. S. Park, W. T. Han, B. H. Lee, U. C. Paek, Y. Chung, and C. S. Kim, "Temperature stability and mechanical strength of long-period fiber gratings fabricated with CO₂ laser," *OFC'2000 Tech. Dig.*, pp. 26, 2000.
- [7] Y. G. Han, B. H. Lee, W. T. Han, U. C. Paek, and Y. Chung, "Resonant Peak Shift and Dual Peak Separation of Long Period Gratings for Sensing Application," *IEEE Photon Technol. Lett.*, vol. 13, p. 699, 2001.
- [8] Y. G. Han, T. V. A. Tran, S. H. Kim, and S. B. Lee, "Development of multiwavelength Raman fiber laser based on phase-shifted fiber Bragg gratings for long-distance remote sensing applications," accepted in *Opt. Lett.*, 2005.
- [9] Y. G. Han, S. H. Kim, and S. B. Lee, "Flexibly tunable multichannel filter and bandpass filter based on long-period fiber gratings," *Opt. Express*, vol. 12, p. 1902, 2004
- [10] Y. G. Han, C. S. Kim, Jin U. Kang, U. C. Paek, and Y. Chung, "Multiwavelength Raman Fiber Ring Laser Based on Tunable

Cascaded Long-Period Fiber Gratings,"
IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, p. 383,
2003.

저|자|약|력



성명: 한영근

- ◆ 학력
 - 1997년 부산대 전자공학과 공학사
 - 1999년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사
 - 2003년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사

- ◆ 경력
 - 2002년 미국 Johns Hopkins 대학 방문 연구원
 - 2003년 ~ 2004년 한국과학기술연구원 연구원
 - 2005년 ~ 현재 한국과학기술연구원 선임연구원



성명: 오경환

- ◆ 학력
 - 1986년 서울대 물리학과 이학사
 - 1988년 서울대 물리학과 이학석사
 - 1991년 Brown Univ. 물리학과 공학석사
 - 1994년 Brown Univ. 물리학과 이학박사

- ◆ 경력
 - 1994년 ~ 1996년 LG전선 광통신연구소 선임연구원
 - 1996년 ~ 현재 광주과학기술원 정보통신공학과 교수
 - 2000년 ~ 2002년 미국 Lucent Bell Lab 초빙연구원
 - 독일 Alexander von Humboldt Research Fellow
 - 영국 Chevening Scholar
 - 일본 JSPS Invitation Fellow

