

Thema

# | 광섬유 레이저, 증폭기용 광섬유 소자 및 재료

## 1. 서론

유 성우 Research Fellow  
(Optoelectronics Research Centre,  
Univ. of Southampton)

오 경환 교수  
(광주과학기술원 정보통신공학과)

1960년대 희토류 이온인 Nd이 첨가된 광섬유 형태의 광 이득 매체가 발표된 이래로[1], 희토류 이온이 첨가된 광섬유 레이저 및 증폭기의 개발은 가장 많은 관심을 끌고 있는 광섬유 소자이다. 특히 1980년대의 용액 침전법을 사용한 저손실 희토류 첨가 광섬유의 개발 공정이 확립된 이후 [2, 3], 광 이득 매체로서의 광섬유 소자의 기술 진보는 끊임없이 이루어지고 있다. 희토류 첨가 광섬유 개발 기술은 광통신망 광섬유 증폭기뿐만 아니라 최근 광섬유 레이저로의 응용이 활발히 전개되고 있다.

광섬유 레이저는 그 기하학적 특성으로 인하여 기존의 고체 레이저에 비해 우수한 열전달 및 회절 한계에 가까운 우수한 질의 레이저 광을 발진시킨다는 장점을 가지고 있다. 이러한 광섬유 레이저의 장점을 충분히 사용하여 최근 개발된 1kW 및 2kW급의 광섬유 레이저는 이제 산업 현장에서 사용되고 있는 기존의 레이저 라인들을 대체할 수 있을 정도의 높은 출력을 보장할 수 있게 되었으며[4, 5], 효율 측면에서도 광섬유 레이저 발진을 위해 사용되는 전력 대비 효율(wall-plug efficiency)이 20%를 넘고 있다[6].

본 글에서는 광섬유 레이저 및 증폭기용 광섬유 소자의 개발을 논의하도록 하겠다. 희토류 광섬유의 개발, 고출력 광섬유 레이저를 위한 광섬유 모재의 구조, 그리고 효율적인 광섬유 레이저 소자를 위한 다양한 광섬유 설계에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 희토류 첨가 광섬유 모재 제조 및 조성

기본적인 실리카 광섬유의 구조는 실리카 유리의 굴절률을 가진 클래딩이 보다 높은 굴절률을 가진 광섬유 코어를 둘러싼 형태를 가지고 있다. 광섬유의 제조는 낮은 광손실을 보장하기 위하여 MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 등의 기상 증착법이 사용되는데, 광섬유 코어층을 증착할 때 Ge, P, Al 등의 불순물을 첨가하여 굴절률을 높이게 된다. 그림 1은 Ge이 코어층에 첨가된 광섬유 모재의 굴절률을 보여주고 있다.

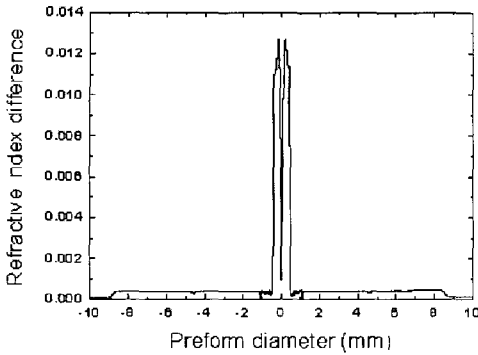


그림 1. Ge이 첨가된 광섬유 모재의 굴절률.

희토류 첨가를 위해서는 용액 침전법이 널리 사용되고 있는데, 광섬유 코어층을 비교적 낮은 온도에서 증착하여 유리화가 되지 않은 실리카 입자 soot가 증착되도록 한 후, 희토류 이온이 첨가된 용액을 soot가 증착된 실리카 유리관에 주입하여 농도차에 의해 희토류 이온이 실리카 입자에 확산되도록 하는 방식이다.

희토류 이온은 주로 3+가인 양이온의 형태를 가지며, 4f 전자껍질이 5s와 5p 전자껍질에 둘러싸여져 있다. 희토류 이온의 4f 전자껍질이 5s, 5p 전자껍질에 둘러싸인 형태로 4f-4f 전이에 의해 발광 스펙트럼이 결정되기는 하지만, 광섬유 코어를 구성하는 유리 조성에 많은 영향을 받는다. 예를 들면, Nd이 첨가된 SiO<sub>2</sub> 코어 조성에 Al 이나 P를 첨가할 경우 발광 스펙트럼의 피크가 1060nm에서 1090nm로 이동하게 되며, 900nm 대역의 발광 크기가 감소하는 반면, 1060nm에서의 발광 크기가 증가하게 된다[7]. 그림 2는 Nd이 첨가된 SiO<sub>2</sub> 조성에 Al/Nd의 비율을 증가시킬 때 관찰되는 발광 스펙트럼 변화이다.

발광 파장뿐만 아니라 희토류 이온이 펌프광으로 여기된 후의 metastable energy level에서의 lifetime, metastable energy level에서 하위 energy level들로 전이되는 정도인 branch ratio 등도 영향을 받는데, Er<sup>3+</sup>의 경우 metastable level에서의 lifetime이 Al-P-SiO<sub>2</sub>에서 Al-G-SiO<sub>2</sub>로 조성을 변경할 경우 10.8ms에서 9.5-10.0ms로 감소한다는 사실이 알려져 있다[8]. Er<sup>3+</sup> 첨가 광섬유의 경우 ESA(Excited State Absorption)에 의한 효율 감소가 문제인데, 코어 조

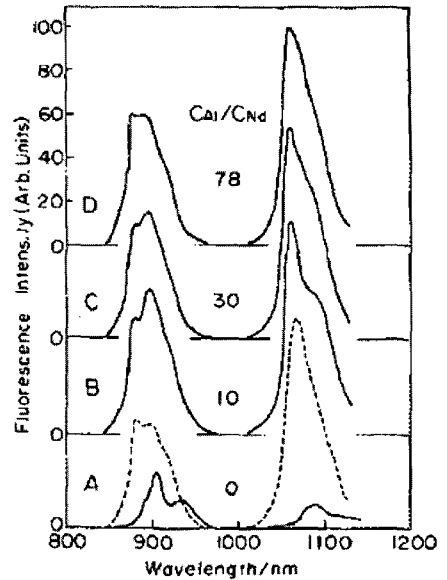


그림 2. Nd 첨가 SiO<sub>2</sub> 및 Al-SiO<sub>2</sub> 발광 스펙트럼[7].

성을 Ge-SiO<sub>2</sub>에서 Al-SiO<sub>2</sub>로 변경시켜 주어 ESA를 완화시킬 수 있다는 것이 보고되었다[9].

광섬유 레이저에 사용되는 희토류 첨가 광섬유는 고출력, 고효율의 레이저 발진을 얻기 위해 높은 수준의 희토류 농도를 요구하나, 어느 수준의 농도를 넘어서게 되면 concentration quenching에 의해 오히려 광섬유 레이저의 효율이 떨어진다. 희토류 첨가 실리카 광섬유에서의 concentration quenching은 첨가된 희토류가 유리 network를 끊은 후 농도가 높아짐에 따라 희토류 이온간의 거리가 가까워지는 것으로 설명이 가능하다[7]. SiO<sub>2</sub> 유리 network 구조에 전자가 3+가인 희토류가 첨가되게 되면 network 내의 전자를 맞추기 위해서 non-bridging oxygen을 형성하게 되는데, 농도가 높아짐에 따라 network에 영향을 미치게 되며 희토류 이온 간의 거리가 매우 가까워질 경우 인접한 이온 간의 상호 작용으로 concentration quenching이 유도되게 된다. Er 첨가 SiO<sub>2</sub> 광섬유는 100ppm의 농도에서 이온 간 상호작용이 일어나는 사실이 밝혀졌다[10]. Concentration quenching을 완화시킬 수 있는 방법으로 SiO<sub>2</sub> network내에 Al을 첨가하여 희토류 이온을 network 내의 Al으로 완화된 network의 자리에 위

치시키는 방법이 알려져 있다. Nd의 경우, Al-SiO<sub>2</sub> 조성 유리에 1000ppm 까지 농도를 올려도 concentration quenching이 유도되지 않으며, 10:1의 Al:Nd 비가 요구된다[7]. 이러한 10:1의 비는 Tm 첨가 광섬유에도 적용되나[11, 12], Er 첨가 광섬유는 항상 이러한 비를 따르지 않는 것으로 알려져 있다[13]. Al은 광섬유 core의 굴절률을 올리는 조성이기 때문에 너무 많은 양을 첨가시킬 경우 광섬유 레이어의 장점 중의 하나인 단일 모드 레이저 광을 얻을 수 없다는 한계를 가지고 있다.

### 3. 고출력 광섬유 레이저의 광섬유 구조

광섬유 레이저의 출력은 일반적으로 광섬유가 흡수하는 펌프광의 크기에 비례한다. 펌프 광원으로 사용되는 다중 모드 고출력 레이저 다이오드 (LD) 출력의 대부분을 광섬유 내로 입사시키기 위해서는 큰 크기의 광섬유 코어가 요구 되는데, 일반적인 단일모드를 지원하는 광섬유는 10 $\mu$ m 내외의 코어직경을 가지고 있기 때문에 다중 모드를 가진 펌프 광원의 입사 효율에 한계를 가지고 있다. 광섬유 내로의 입사 효율을 높이면서도, 단일 모드 레이저 발진을 지원할 수 있는 방법으로 Double-cladd Fiber (DCF)구조가 고안되어 널리 사용되고 있다[14]. DCF 구조는 광섬유 클래딩 외부의 폴리머 코팅을 광섬유 클래딩의 굴절률 보다 낮은 굴절률을 가진 폴리머를 사용하여 광섬유를 코팅하여 주어 얻을 수 있는데, 펌프 광원을 광섬유 코어가 아닌 코어보다 훨씬 넓은 직경-일반적으로 125 $\mu$ m-를 가진 실리카 클래딩에 입사시키기 때문에 매우 높은 입사 효율을 기대할 수가 있다. 그림 3은 DCF 구조를 가진 희토류 첨가 광섬유 내를 펌프광,  $\lambda_p$ , 과 신호광,  $\lambda_s$ , 이 도파되는 방식을 나타내고 있다. 실리카 클래딩에 입사된 펌프광은 실리카 클래딩과 폴리머 클래딩의 굴절률 차이에 의해 도파되며, 신호광은 코어와 실리카 클래딩의 굴절률 차이에 의해 진행된다. 이러한 구조의 가장 큰 장점은 경제성 있는 다중 모드 펌프 광원을 사용하여 고출력의 단일 모드 광섬유 레이저를 얻을 수 있다는 것이다.

DCF 구조 광섬유 클래딩에 입사된 펌프광 중 일

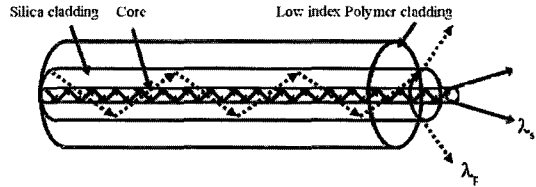


그림 3. Double-clad fiber (DCF) 내의 펌프광,  $\lambda_p$ , 과 신호광,  $\lambda_s$ , 의 도파 경로.

부는 광섬유 코어 내의 희토류 이온을 만나 흡수되나, 원통형의 기하학적 구조로 인해 다른 일부는 코어를 만나지 못한 상태로 계속 코어를 비껴 지나가면서 광섬유 끝단까지 도파될 수가 있다. 이런 펌프광은 광섬유 내에서 흡수되지 못한 상태로 통과되기 때문에 펌프광의 손실로 작용한다. 광섬유의 코어를 지나지 못하는 펌프광의 횡단 경로를 바꾸어 희토류에 흡수시키기 위한 방법으로 원형의 광섬유 단면을 D-모양으로 만들어 준다. 그림 4는 펌프광의 횡단 경로를 무작위로 만들어 주기 위하여 고안된 여러 모양의 DCF 단면 모양이다. 그림 4에서 Double D-모양의 단면을 가진 DCF가 가장 높은 흡수를 제공하는 것으로 밝혀졌으며, 특히 펌프 광원의 입사 조건에 상관없이 동일한 펌프광 흡수를 유지한다는 사실이 보고되었다[15, 16].

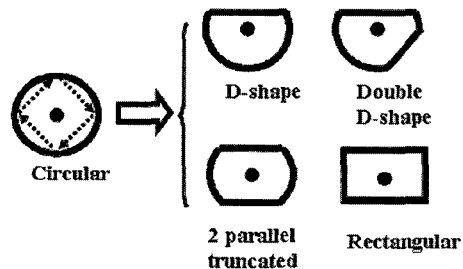


그림 4. DCF 구조 광섬유의 단면. Circular DCF 단면 내의 점선은 코어를 만나지 않는 펌프광의 횡단 경로임.

### 4. 광섬유 레이저로의 응용

#### 4.1 실험 구성

광섬유 레이저는 크게 펌프 광원으로서의 LD, 이득

매체로의 희토류 첨가 광섬유, 레이저 공진기 구성을 위한 mirror, bulk grating 등으로 구성되어 있다. 그림 5는 대표적인 광섬유 레이저 실험 구성을 나타내고 있다. 레이저 공진은 R1과 R2에서 일어나는데, R1은 광섬유를 직각으로 잘라 얻어진 4%의 Fresnel 반사를 나타내며, R2는 DM2에서의 100% 반사를 의미한다.

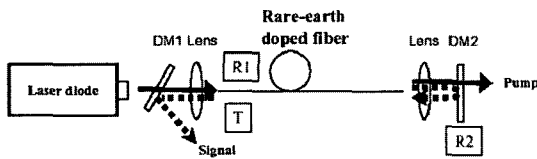


그림 5. 대표적 레이저 실험 구성도. DM: Dichroic mirror.

LD에서 방출된 펌프광은 DM1을 통과한 후 렌즈를 통하여 희토류 첨가 광섬유에 입사된다. 광섬유를 통과한 후 흡수되지 않고 남은 펌프광은 DM2에서 외부로 빠져나가게 된다. 희토류 이온에 흡수된 펌프 광원에 의해 광섬유 내에서 발생된 신호광은 R2에서 100% 반사된 후 R1에서 4% 반사되며, 나머지 96%는 공진기 밖으로 빠져나와 (T), DM1에서 다시 반사되어 Powermeter, OSA 등에 의해 특성이 분석된다. 파장 가변을 위해 DM2를 bulk grating으로 대체하기도 하며, 펄스 신호광의 발진 그리고 polarized 신호광을 얻기 위해 AOM(Acousto-optic Modulator) 및 polarizer를 렌즈와 DM2 사이에 두기도 한다.

### 4.2 희토류 첨가 광섬유 레이저

현재까지 대표적인 광섬유 레이저는 Nd, Er, Yb, Tm 등이 첨가된 광섬유에 의해 구현되고 있다. 이들이 첨가된 광섬유 레이저의 energy transition level 이 그림 6에 나타나 있다.

Nd 광섬유는 808nm를 펌프 광원으로 하여  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  의 4 level transition과  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  의 3 level transition 이 경쟁하고 있는 system이다. 4 level system이 3 level system에 비해 비교적 낮은 펌프 광원을 요구하기 때문에 전통적인 Nd 광섬유 레이저는  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  에 의한 1060nm의 발진 대역을 가지

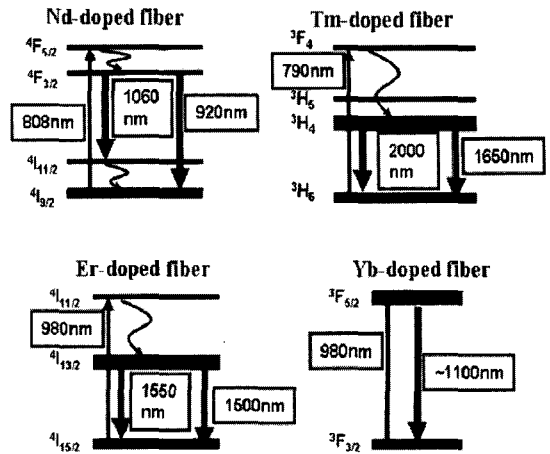


그림 6. 대표적인 희토류 이온이 첨가된 energy transition level diagram.

고 있다. 이 대역에서 30W의 단일 모드 레이저 발진이 발표된바 있다[17]. 최근의 펌프 광원인 LD의 출력이 향상됨에 따라 3 level system 에 의한 920nm 대역 광섬유 레이저에 대한 연구가 진행되었는데, 1060nm 대역의 광섬유 내 도파를 효과적으로 차단해 줄 수 있는 광섬유 구조인 short band pass filter 기능을 가진 W-자 광섬유의 설계로 920nm에서의 광섬유 레이저 발진이 구현되었다[18, 19]. 그림 7은 W-자 광섬유 설계로 제작된 Nd 첨가 광섬유의 short band pass filter 특성을 보여주는데, 광섬유를 굽힘에 따라 광섬유 내에서 도파되는 LP<sub>01</sub> 모드 cut-off 파장이 짧아짐을 알 수가 있다.

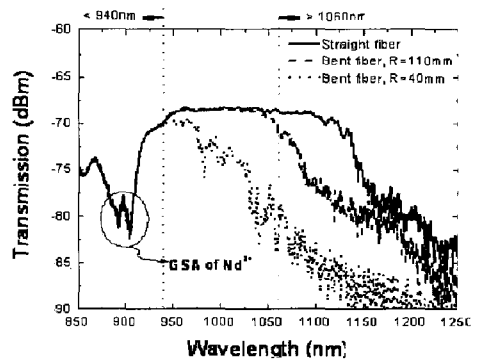


그림 7. W-자 Nd 첨가 광섬유의 LP<sub>01</sub> 모드 cut-off 특성. GSA: Ground-state Absorption[19].

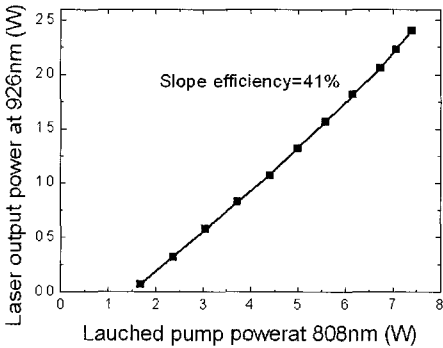


그림 8. Nd 첨가 Al-SiO<sub>2</sub> 광섬유 레이저 특성[18].

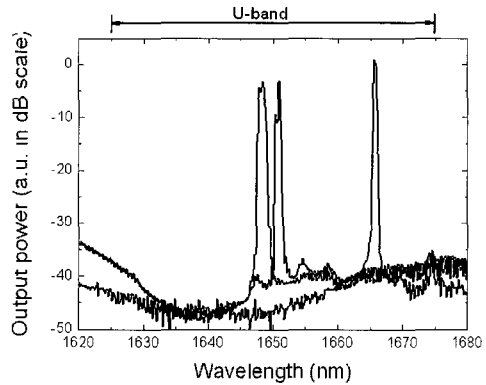


그림 10. Tm 첨가 W-자 광섬유 레이저의 U-band에서의 파장 가변 스펙트럼.

그림 8은 Nd이 첨가된 Al-SiO<sub>2</sub> 조성의 W-자 광섬유 설계로 얻어진 레이저 특성으로, 펌프광의 입사 출력 대비 41%의 경사 효율을 가지는 것을 알 수 있다. 926nm에서 단일 모드를 가진 2.4W의 최대 출력을 얻을 수 있었으며, threshold power는 1.68W였다. 그림 9는 광섬유 공진기 내에 bulk grating을 삽입하여 얻은 파장 가변 스펙트럼으로 908-938nm의 파장 가변 특성을 얻을 수 있었다.

동일한 W-자 광섬유를 사용하여 Tm, Er 첨가 광섬유에서 1650nm (U-band), 1500nm (S-band)를 각각 얻을 수 있다는 것을 광섬유 설계를 통해 확인되었다[20]. 그림 10은 W-자 광섬유 설계를 이용한 Tm 광섬유 레이저의 U-band에서의 파장 가변 특성을 나타낸다.

Tm 광섬유는 790nm를 펌프 광원으로 하여  ${}^3H_4 \rightarrow$

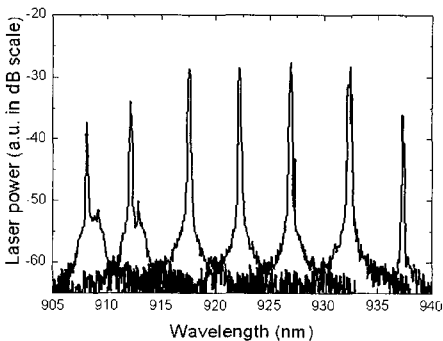


그림 9. Nd 첨가 Al-SiO<sub>2</sub> 광섬유 레이저의 파장 가변 스펙트럼[18].

${}^3H_6$ 의 3 level system으로 주로 2 $\mu$ m 대역에서 신호 광을 가진다. 특이할 사항은, Tm의 농도가 광섬유 내에서 1.3wt% 이상이 될 경우,  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_4$ 와  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$  간의 cross-relaxation에 의해 레이저의 경사 효율이 quantum efficiency인 41%를 넘는다는 것이다. 이러한 특성을 활용한 2.2wt%의 Tm 농도를 가진 광섬유가 개발되었으며, 흡수 펌프 광원 대비 효율이 74%이며 15W의 출력을 가진 2 $\mu$ m 대역 Tm 광섬유 레이저가 보고되었다[21]. 이 대역의 Tm 광섬유 레이저는 고농도의 Tm을 가진 광섬유의 개발에 초점이 맞추어져 있는 추세이다.

Er 광섬유는 광섬유 통신용으로 개발이 많이 이루어 졌으며, C-band (1530-1565nm)에서 L-band (1565-1625nm)를 지나, S-band (1460-1530nm) 까지 증폭 영역을 확대하고 있다[22]. Gain 조절과 열적 안정성 확보를 위한 연구들이 진행되었는데, 광섬유의 cladding 영역에 Sm를 첨가하여 코어에 첨가된 Er의 발광크기를 조절해줌으로써 gain control이 외부의 filter 없이도 구현되었으며[23], Antimony oxide 실리카 광섬유와 실리카 광섬유를 연결해주는 형태로 Athermal 특성을 가진 Er 증폭기가 보고되었다[24].

Yb 광섬유 레이저는 980nm를 펌프 광원으로 사용하여  ${}^3F_{5/2} \rightarrow {}^3F_{3/2}$ 의 energy transition에 의한 1100nm 대역에서 주로 발진한다. Yb 광섬유 레이저는 고출력 개발용으로 많은 연구가 진행되어 왔었는데, energy transition이 quasi-4 level system이며, 펌프광과 신호광의 파장이 가깝다는 점 등으로 인해

매우 높은 효율을 기대할 수 있기 때문이다. 최근의 단일 모드 고출력 광섬유 레이저는 대부분 Yb 광섬유를 사용하고 있다. 최근 2kW급의 광섬유 레이저가 보고되었으며[5], 출력은 꾸준히 증가하는 추세이다. Yb 광섬유가 고효율의 레이저를 발진할 수 있기 때문에 광섬유 내로 펌프 광원의 입사 효율을 더 올리기 위한 연구들이 진행되었는데, 광섬유의 내부 클래딩을 공기층으로 둘러싸는 형태인 holey fiber 혹은 JAC (Jacketed Air Cladding) fiber 등이 개발되었다. 이러한 구조로 광섬유 내부 클래딩과 공기층간의 굴절률 차이를 최대화 할 수 있어 광섬유의 NA (Numerical Aperture)를 증가시켜 더 많은 펌프 광원을 광섬유 내에서 받아들일 수 있다. 그림 11은 Yb 이 첨가된 JAC fiber의 단면 사진으로, 내부 클래딩 지름은 23 $\mu$ m이며, 내부 클래딩과 공기층간의 NA는 0.5가 넘는다[25]. 이러한 광섬유 구조로 980nm에서 발진하는 단일 모드 4.3W의 고출력 Yb 광섬유 증폭 레이저가 최초로 구현되었다.

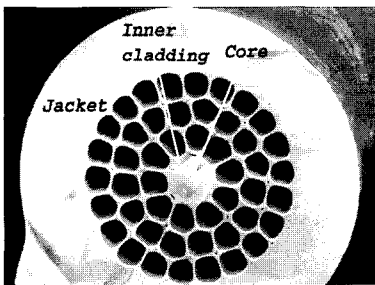


그림 11. Yb 첨가 JAC fiber의 단면[25].

### 5. 결론

광섬유 레이저는 고출력으로 단일 모드의 레이저 광을 얻을 수 있다는 점에서 기존의 bulk 레이저에 비해 우수하다고 말할 수 있다. 광섬유 레이저에 사용되는 희토류 첨가 광섬유는 고농도, 저손실의 특성을 제공하여 주어야 하며, 원하는 파장 대역에서의 레이저를 제공할 수 있도록 조성이 선택되어야 한다. 기존의 광섬유 조성은 실리카 내에 Ge, Al, P 등이 첨가되어 굴절률 및 희토류 이온의 발광 특성을 조절해

왔으나, 좀 더 높은 농도의 희토류를 concentration quenching 없이 실리카 광섬유 내에 용해시키기 위해서는 새로운 재료의 개발이 요구된다.

광섬유 레이저의 출력은 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 단일 모드 특성에 단일 편광 특성을 가진 광섬유 레이저의 개발이 주목받고 있다. Bow-tie, PANDA 형태의 광섬유 설계를 통하여 가능성이 확인 되었으며[26, 27], 출력을 현재 가능한 kW 급으로 올리는 과제가 남아 있다.

광섬유의 출력이 증가함에 따라 비선형 특성인 SBS(Stimulated Brillouin Scattering)이 광섬유 레이저 효율을 저하시키는 인자가 되었으며, 이러한 비선형 특성을 피할 수 있는 방법이 강구되어야 한다.

고출력 면에서 뿐만 아니라 파장 대역을 넓히는 연구도 관심을 끌고 있다. 광섬유 레이저는 기존의 결정 레이저에 비해 넓은 대역의 발광 스펙트럼을 가지고 있지만, 모든 파장 영역을 포함하지는 못한다. 그림 12는 현재 영국 University of Southampton의 Optoelectronics Research Centre 에서 개발된 광섬유 레이저의 출력과 파장을 나타내고 있다[28]. 그림에서 확인할 수 있듯이 근적외선 영역이 주로 광섬유 레이저 발진 대역이나, S-band와 U-band에서 고출력 광섬유 레이저가 구현되지는 못하였다. 특히 가시 광선영역은 응용분야가 다양하게 있음에도 불구하고 우수한 레이저 광 특성을 가지는 광섬유 레이저로는 개발되지 못하고 있다. 아직 구현되지 못한 파장 대역의 고출력 광섬유 레이저 개발이 이루어질 것으로 기대된다.

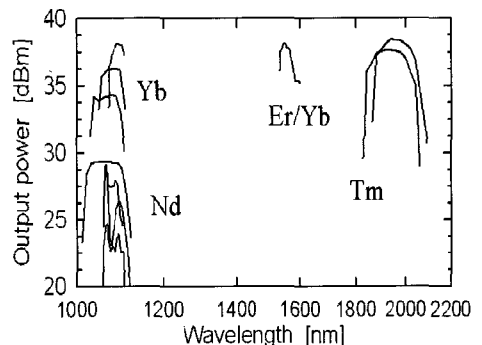


그림 12. 고출력 광섬유 레이저의 파장 및 출력[28].

참고 문헌

- [1] E. Snitzer, "Optical maser action of Nd<sup>3+</sup> in a barium crown glass," *Pays. Rev. Lett.*, vol. 7(12) p.444, 1961.
- [2] S. B. Poole, D. N. Payne, R. J. Mears, M. E. Fermann, and R. I. Laming, "Fabrication and characterisation of low-loss optical fibres containing rare-earth ions," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4 p. 870, 1986.
- [3] J. E. Townsend, S. B. Poole, D. N. Payne, "Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibres," *Electron. Lett.*, vol. 23(7) p. 329, 1987.
- [4] Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1kW of continuous-wave output power," *Electron. Lett.*, vol. 40(8), p. 470, 2004.
- [5] IPG Photonics, Proc. in Photonics West, 2005.
- [6] IPG Photonics web page, <http://www.ipgphotonics.com>.
- [7] K. Arai, H. Namikawa, K. Kumata, T. Honda, Y. Ishii, and T. Handa, "Aluminum or phosphorous co-doping effects on the fluorescence and structural properties of neodymium-doped silica glass," *J. Appl. Phys.*, vol. 59(10) p. 3430, 1986.
- [8] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, Erbium-doped fiber amplifiers, Academic press, SD, Chap. 4, 1999.
- [9] S. B. Poole, "Fabrication of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> co-doped optical fibres by a solution-doping technique," Proc. 14th European Conference on Optical Communications, Part 1, p. 433, 1988.
- [10] M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi, and E. Sugita, "Concentration effect on optical amplification characteristics of Er-doped silica single-mode fibers," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 2(1), p. 43, 1990.
- [11] S. D. Jackson and S. Mossman, "Efficiency dependence on the Tm<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup> concentrations for Tm<sup>3+</sup>-doped silica double-clad fiber lasers," *Appl. Opt.*, vol. 42(15), p. 2702, 2003.
- [12] S. D. Jackson, "Cross relaxation and energy transfer upconversion processes relevant to the functioning of 2 $\mu$ m Tm<sup>3+</sup>-doped silica fibre lasers," *Opt. Comm.*, vol. 230, p. 197, 2004.
- [13] M. J. F. Digonnet and E. Snitzer, Rare earth doped fiber lasers and amplifiers, M. J. F. Digonnet (Ed.), Marcel Dekker, N.Y., Chap. 2, 1993.
- [14] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, "Double-Clad, offset core Nd fiber laser," Proc. OFC/OFS' 88 PD5, 1988.
- [15] P. Leproux and S. Fevrier, "Modeling and optimization of double-clad fiber amplifiers using chaotic propagation of the pump," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 6, p. 324, 2001.
- [16] P. Leproux, D. Valerie, P. Roy, D. Pagnoux, F. Mortessagne, O. Legrand, "Experimental study of pump power absorption along rare-earth-doped double clad optical fibres," *Opt. Comm.*, vol. 218, p.249, 2003.
- [17] H.Zellmer et al., Proc. Optical Amplifiers and their applications, OSA, p. 251, 1997.
- [18] D. B. S. Soh, S. Yoo, J. Nilsson, J. K. Sahu, K. Oh, S. Baek, Y. Jeong, C. Codemard, P. Dupriez, J. Kim, and V. Philippov, "Neodymium-doped cladding pumped Aluminosilicate fiber laser tunable in the 0.9- $\mu$  m wavelength range," *J. Quan. Electron.*, vol. 40, p. 1275, 2004.
- [19] S. Yoo, D. B. S. Soh, J. Nilsson, J. K. Sahu, J. Kim, Y. Jung, S. Maruyama, and K. Oh, "Analysis of W-type waveguide for Nd-doped fiber laser operating near 940nm,"

Opt. Comms. (in press).

[20] S. Yoo, Y. Jung, J. Kim, K. Oh, "W-type Fiber design for application in U- and S-band amplifiers by controlling the LP01 mode long wavelength cut-off," Opt. Fiber Technol. (accepted).

[21] S. D. Jackson, "Cross relaxation and energy transfer upconversion processes relevant to the functioning of  $2\mu\text{m}$  Tm<sup>3+</sup>-doped silica fibre lasers," Opt. Comm., vol. 230, p. 197, 2004.

[22] M. Arbore, Y. Zhou, G. Keaton, and T. Kane, ">30dB gain at 1530nm in Sband Erbium-doped silica fiber with distributed ASE suppression," Proc. SPIE, vol. 4989, p. 47, 2003.

[23] S. Kim, U.-C. Ryu, Oh, K, "41-nm 3-dB gain-band optical amplifier using an Er-doped core and Sm-doped inner-cladding fiber without external filters," Photon. Technol. Lett., vol. 12(8), p. 986, 2000.

[24] Y. -E. Im, U. -C. Ryu, J. W. Lee, K. Oh, D. J. DiGiovanni, and B. Wang, "Athermal Optical Gain Block in C-Band by Serial Concatenations of Erbium-Doped Antimony Oxide Silica Glass Fiber," Photon. Technol. Lett., vol. 17(2), p. 318, 2005.

[25] D. B. S. Soh, C. Codemard, J .K. Sahu, J. Nilsson, V. Philippov, C. Alegria, and Y. Jeong, "A 4.3W 977 nm ytterbium-doped jacketed-air-clad fiber amplifier," Proc. Advanced Solid State Physics 2004, MA3, 2004.

[26] K. Tankala, A. Carter, D. Machewirth, J. Farroni, J. Abramczyk, and U. Manyam, "PM double-clad fibers for high power lasers and amplifiers," Proc. Photonics West 2003, p. 1, 2003.

[27] D. A. V. Kliner, J. P. Koplow, L. Goldberg, A. L. G. Carter, and J. A. Digweed,

" Polarization-maintaining amplifier employing double-clad bow-tie fiber," Opt. Lett., vol. 26(4), p. 184, 2001.

[28] J. Nilsson, W. A. Clarkson, R. Selvas, J. K. Sahu, P. W. Turner, S. -U. Alam, and A. B. Grudinin, "High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber laser," Opt. Fiber Technol., vol. 10, p. 5, 2004.

저|자|약|력



성 명 : 유 성우

◆ 학 력

- 1999년 한양대 무기재료공학과 공학사
- 2001년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사
- 2005년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사

◆ 경 력

- 2003년 ~ 2004년 영국 Southampton 대학 Optoelectronics research Centre 객원 연구원
- 2004년 일본 동경대 전자공학과 객원 연구원
- 2004년 ~ 2005년 영국 Southampton Univ. Optoelectronics research Centre Research assistant
- 2005년 ~ 현재 영국 Southampton Univ., Optoelectronics research Centre Research Fellow



성 명 : 오 경환

◆ 학 력

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

◆ 경 력

- 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