

Nd 첨가 광섬유 레이저 제작 및 발진특성

이상배 · 조재철 · 김선호 · 김상국 · 최상삼
한국과학기술연구원 응용과학실

김 병 윤
한국과학기술원 물리학과

김 영 덕
서강대학교 물리학과

(1990년 7월 4일 받음)

MCVD 법과 액체 첨가법으로 실리카 광섬유 코아에 Nd를 첨가하여 능동 광섬유 소자를 제조하였다. 514.5 nm Ar 레이저를 여기광원으로 하고, dichroic 레이저 거울로 Fabry-Perot 공진기를 구성하여 발진시킨 결과, 중심파장 1.096 μm 에서 발진선폭 15 nm로 발진하는 광섬유 레이저를 구현할 수 있었다. 여기광원의 세기에 따라 발진특성을 조사하였고, 레이저 출력거울의 반사율을 다양하게 조절하여 실험한 결과 출력거울 반사율이 67.5%일 때 slope 효율 1.28%, 최대 발진출력 1.88 mW를 얻었다.

I. 서 론

저손실 실리카 유리의 제조가 가능해지고 반도체 레이저가 상용화 됨으로써 실리카 유리 광섬유에 의한 광통신이 실용화 되었다. 그러나 실리카 유리의 최저 광손실 영역인 1.33 μm 와 1.55 μm 에서 광원으로 사용되는 반도체 레이저들은 아직 가격이 비싸며, 특히 장거리 통신에 사용되는 반도체 광증폭기는 광섬유와의 구조상 상이함으로 인해 증폭 효율이 떨어지고, 복잡한 전자회로들이 필요하다. 이러한 문제들을 광섬유 자체로 해결하고자 하는 연구가 수년전부터 진행되었고, 결국 상용 레이저 물질들의 우수한 특성과 광섬유의 고에너지 집적도를 결합한 회토티 금속을 첨가한 광섬유가 개발되었다.^(1,2) 회토티 금속(대표적으로 Nd⁺³, Er⁺³ 등)을 첨가한 능동 광섬유는 통신용 광섬유 제조법⁽³⁾ 개선하여 사용함으로써 제조가 비교적 간단하며, 저손실이고 다량 생산이 가능하므로 가격이 저렴하다. 또한, 광섬유 코아에 첨가되는 물질에 따라 쉽게 새로운 광원을 얻을 수 있으며, 특히 Nd⁺³과 Er⁺³를 첨가한 광섬유는 광통신의 제 2,

제 3의 저광손실 영역인 1.33 μm 와 1.55 μm 에서 레이저 발진이 가능하므로 광통신용 광원으로⁽⁴⁻⁶⁾ 사용 가능성이 있다.

이러한 광섬유 레이저는 일반 glass 레이저와는 달리 특별한 기하학적인 구조를 가짐으로써 몇 가지 독특한 특성을 나타내고 있다. 첫째, 빛을 전송하는 광섬유 코아에 강한 여기 레이저 광을 집속시켜 보내므로 낮은 문턱 에너지에서 쉽게 레이저 발진이 가능하며 둘째, 광섬유 코아 체적에 비해 클래딩 영역의 체적이 수백배 이상이고 코아 영역의 표면적이 넓어 냉각이 잘되므로 연속 발진이 쉽게 일어난다. 그러므로 광섬유 레이저는 수 mW의 여기 레이저로써 연속발진을 시킬 수 있다. 셋째, 광섬유 레이저의 공진기(cavity)는 유연성이 있어서 마음대로 휘거나 구부려도 레이저 발진이 가능하므로 센서나 의료용 레이저로 사용이 기대되며 특히 기존 광통신용 광섬유와 구조가 동일하므로 광통신 분야에 높은 효율로 접속 사용될 수 있다.

본 연구에서는 Nd가 첨가된 광섬유를 MCVD(Modified Chemical Vapour Deposition)법⁽⁹⁾과 액체 첨가법으로 제조하여 발광특성을 조사하였으며, Nd의 세 가지 발광영역 중 발광세기도 크며 4준위계인 1.09 μm 근방의 파장에서 레이저를 연속 발진시켜 특성을 조사하

본 연구는 과학기술처의 지원에 의해 수행되었고, 재료 일부는 한국과학재단 레이저장려 연구센터의 보조를 받았다.

였으며, 출력기울의 반사율을 조절하여 최대의 출력을 얻을 수 있는 조건을 조사하였다.⁽⁷⁾

II. Nd 첨가 광섬유 제조

희토류 금속이 첨가된 실리카 광섬유를 제조할 때 일반 통신용 광섬유와 같은 저손실을 유지하며 광섬유 코아에 희토류 금속을 첨가하기 위해 상용화된 광섬유 제조법인 MCVD 법을 기본공정으로 하며, 희토류 금속의 Chloride 화합물을 직접 가열하여 기체상태로 첨가⁽¹⁾하거나 물이나 알콜과 같은 용매에 녹여 미리 제조된 광섬유 제조용 석영관의 코아 영역에 액체상태로 첨가하는 방법⁽²⁾ 등이 있다.

기체상태 첨가법은 광섬유 모재를 제조하기 전에 dopant carrier chamber 를 만들어 그 내벽에 NdCl₃를 균일하게 분포시킨 후 MCVD법으로 클래딩 층을 증착하고, chamber 를 2차 버너로 1000°C 정도로 가열하여 이곳을 통과하는 코아 구성물질 SiCl₄나 GeCl₄가 NdCl₃ 증기와 함께 광섬유 제조용 석영관내에 유입되도록 하여 산소, 수소버너로 코아층을 증착한다. 이 때 일반 광섬유 제조시보다 낮은 온도로 증착하여 완전히 유리화가 안된 porous 한 코아층이 되도록 한 후, 석영관내에 Cl₂ 기체를 유입시키며 산소, 수소버너로 탈수화한다. 이것은 NdCl₃가 친수성이 강해 수분을 많이 함유하고 있으므로 위와 같이 제조된 광섬유 코아내로 진행되는 빛의 광손실을 크게 증가시킬 우려가 있으므로 반드시 탈수화 과정을 거쳐야 한다. 이 과정이 끝난 후 1800°C의 온도에서 코아층을 유리화하고 응축시켜 광섬유 모재를 제조한다. 기체 첨가법에 의한 광섬유 제조법은 dopant carrier chamber 를 만들거나 희토류 금속을 첨가하기 위해 준비하는 과정이 까다롭고, 2차 버너의 가열온도가 정밀하게 조절되어야 하며, NdCl₃ 증기가 광섬유 제조용 석영관의 길이 방향으로 균일하게 첨가되지 않는 단점들이 있다.

액체상태 첨가법은 첨가물질인 NdCl₃를 증류수에 녹여 액체상태로 광섬유 코아에 첨가하는 방법으로써, 기체상태 첨가법에 비해 Nd 를 광섬유 코아에 균일하게 첨가할 수 있고, 두 가지 이상의 물질을 동시에 첨가할 때에도 각 물질의 첨가 비율을 쉽게 조절할 수 있으며, 제조방법도 비교적 단순하므로 널리 쓰이고 있다. 본 연구에 사용한 시료도 모두 액체상태 첨가법으로 제조하였으며, 그 제조과정은 그림 1과 같다.

MCVD법으로 광섬유 제조용 석영관에 클래딩층을 증

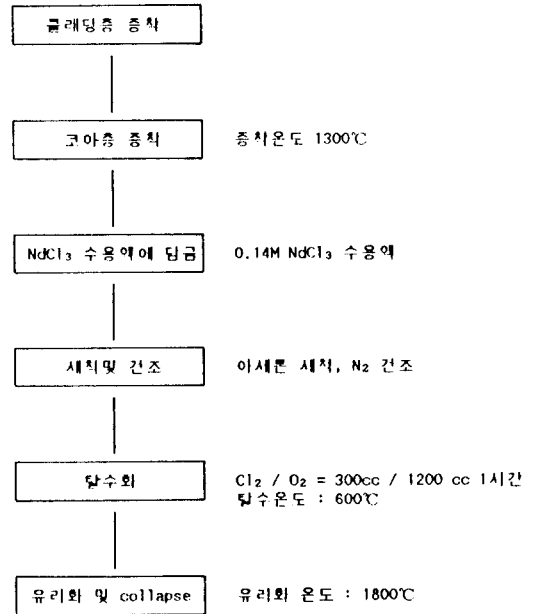


그림 1. 액체상태 첨가법에 의한 Nd 첨가 광섬유 제조 도표.

착한 후, 1300°C의 온도에서 porous 한 코아층을 증착한다. 이렇게 준비된 광섬유 제조용 석영관을 선반으로부터 분리하여 준비된 NdCl₃ 수용액에 담구어 수용액이 코아층으로 흡수되게 한 뒤, 다시 선반에 장치하여 Cl₂와 O₂ 분위기에서 탈수화하고, 1800°C 온도에서 코아층을 유리화시킨 뒤 응축시켜 Nd가 첨가된 광섬유 모재를 제조한다. 본 연구에 사용한 시료의 제조 조건은 다음과 같다.⁽⁸⁾ SiO₂-P₂O₅-F₂의 구성으로 클래딩층을 7회 증착하였으며 1300°C의 온도에서 SiO₂-GeO₂ 구성으로 코아층을 1회 증착하였고, 광섬유 제조용 석영관을 선반에서 분리하여 0.14 M NdCl₃ 수용액에 30분간 담구어 후 아세톤으로 세척하고 질소로 건조시켰다. 석영관을 다시 선반에 거취시켜 Cl₂와 O₂를 각각 300 cc/min, 120 cc/min의 유량으로 흘리며 600°C의 온도에서 1시간 탈수하였으며, 1800°C의 온도에서 유리화시키고 collapse 하였다. 제조된 광섬유의 제원은 외경 120 μm, 코아직경 7 μm, 1.09 μm에서 V 값은 2.2였다.

III. Nd 첨가 광섬유의 광학적 특성

Nd가 첨가된 광섬유의 광흡수 스펙트럼에 의해 광섬유 레이저를 제작하였을 때 여기 가능한 파장을 결정할

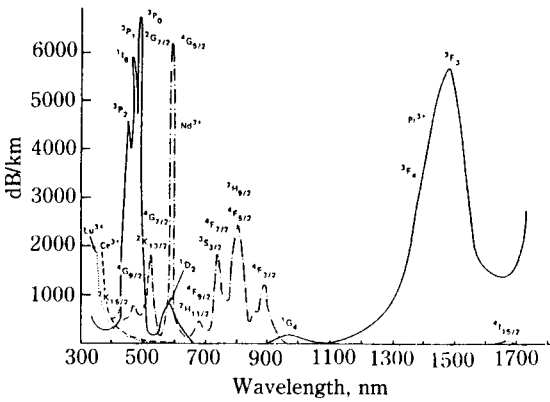


그림 2. Nd³⁺, Ce³⁺, Pr³⁺ 그리고 Lu³⁺ 첨가 실리카 광섬유의 광흡수 스펙트럼(참고문헌 8).

수 있다. 그림 2는 Nd가 첨가된 실리카 광섬유 소재의 광흡수 스펙트럼이다.⁽⁹⁾ 최대의 광흡수는 그림 3의 ⁴I_{9/2} → ⁴G_{5/2} 전이에 의한 590 nm 근방의 흡수띠에 의한 것이며, ⁴I_{9/2} 준위에서 ²K_{13/2}, ⁴G_{7/2}로의 전이에 의한 510 nm 근방의 흡수띠, ⁴F_{7/2}, ³S_{3/2} 로의 전이에 의한 750 nm 근방의 흡수띠, ²H_{9/2}, ⁴F_{5/2}로의 전이에 의한 800 nm 근방의 흡수띠 그리고 ⁴F_{3/2}로의 전이에 의한 900 nm 근방의 흡수띠 등이 있다. 이 중에서 800 nm, 900 nm 근방의 흡수띠들은 범용 반도체 레이저의 발진파장과 일치하므로 반도체 레이저를 여기광원으로 사용하여 광섬유 레이저를 구성할 수 있음을 보여준다. 본 연구에서는 514.5 nm Ar 레이저를 여기광원으로 사용하여 ⁴I_{9/2} 준위에서 ²K_{13/2} 준위로 여기시켜 실험하였다.

회토류 금속을 첨가한 광섬유를 이용하여 광섬유 레이저를 제작할 때 이득을 크게 하기 위해 적정 길이를 선택하여야 한다. 이 적정 길이는 여기광원의 세기가 1/e로 줄어들 때 까지의 길이를 말하는 것으로, 3준위계의 경우에는 발광파장에 흡수띠가 동시에 있으므로 적정 길이에 따라 이득이 크게 좌우되나, 4준위계 경우에는 발광파장에서 흡수띠가 동시에 존재하지 않으므로 적정 길이보다 다소 길더라도 이득의 변화가 그리 크지 않다. 본 실험에 사용한 Nd 첨가 광섬유의 여기파장에서의 광손실을 측정하기 위해 광섬유 길이 변화에 따른 514.5 nm 여기광원의 세기를 측정하여 그래프가 그림 4이다. 이 그래프에 의해 계산된 광흡수 계수 α_p=0.044/cm 이고 적정 길이는 23 cm 이었다. 본 실험에서는 ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} 전이에 의한 1.09 μm 근방의 발광을 이용하여 레이저를 구성하였는데 이곳은 4준위계이므로 광섬유 길이에 이득이 크게 영향을 받지 않아 적정 길이보다 다소 긴 43 cm 를

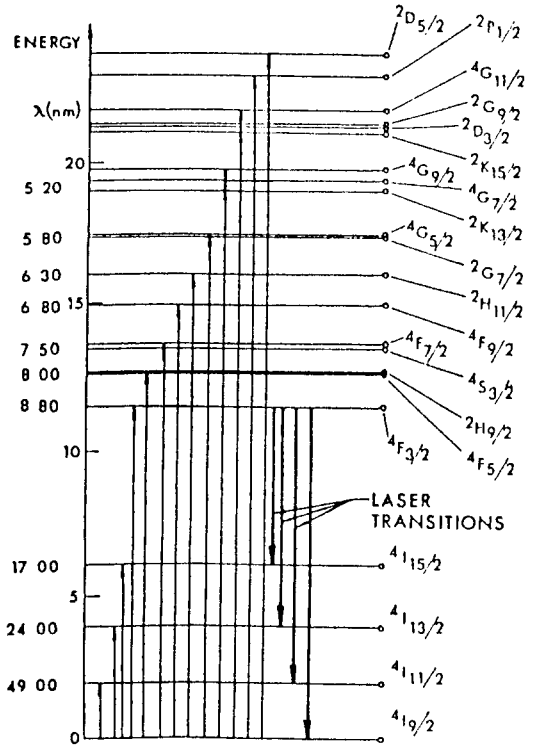


그림 3. Nd 첨가 실리카 유리의 에너지 준위(참고 문헌 10).

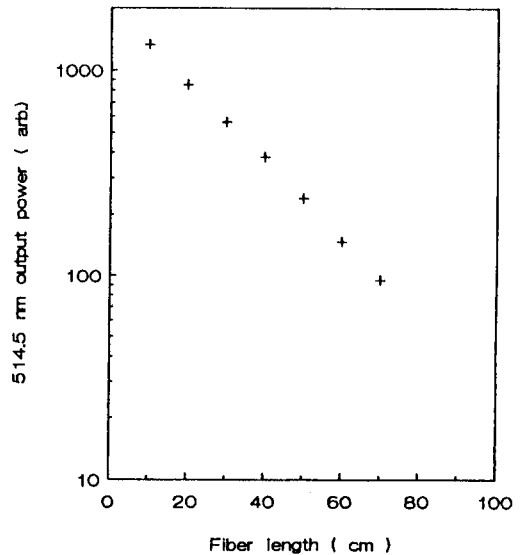


그림 4. Nd 첨가 광섬유의 길이 변화에 따른 514.5 nm 여기광원의 세기 변화.

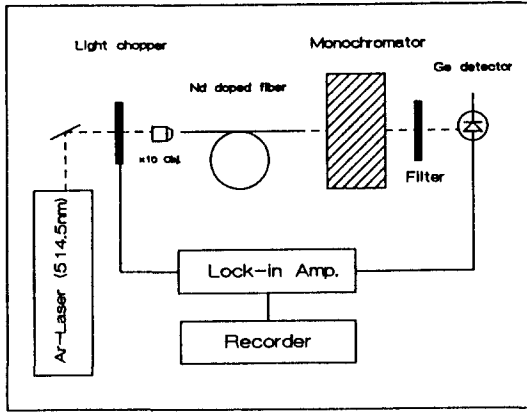


그림 5. Nd 첨가 광섬유의 발광스펙트럼 측정 장치도.

사용하여 광섬유 레이저를 구성하였다.

Nd 가 첨가된 광섬유의 발광스펙트럼은 레이저 발진이 가능한 파장을 결정해주며 사용 가능한 파장의 폭을 알 수 있도록 해준다. 본 실험에서는 514.5 nm Ar 레이저를 여기 광원으로 하여 그림 5와 같이 장치하여 발광스펙트럼을 관측하였다. S/N 비가 좋도록 여기광원을 빛살 가르게 (light chopper)를 거쳐 현미경 대물렌즈로 집광시켜 광섬유 코아에 입사시킨 뒤, monochromator로 출사되는 빛의 파장분포를 조사하였다. monochromator에서 출사되는 빛살에 포함된 여기광원의 2차회절된 빛을 제거하기 위해 700 nm에서 cut-on되는 filter를 거쳐 Ge detector로 검지하여 Lock-in Amp로 신호처리를 하였으며, 최종 신호는 strip chart recorder로 기록하였다. 측정된 Nd 첨가 광섬유의 발광 스펙트럼은 그림 6과 같다. 939 nm, 1.089 μm , 1.36 μm 근방에서 발광이 있었으며 이것은 그림 3의 ${}^4F_{3/2}$ 준위에서 ${}^1I_{9/2}$, ${}^1I_{11/2}$, ${}^1I_{13/2}$ 준위로의 전이에 의한 것이다. 여기서 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^1I_{9/2}$ 로의 전이는 준 3준위계이며, 나머지 두 전이는 4준위계이다. 본 연구에서는 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^1I_{11/2}$ 로의 전이에 의한 1.089 μm 에 중심을 둔 발광으로 광섬유 레이저를 발진시켰는데, 이 발광은 최대폭 100 nm를 가지며 Nd-Glass 레이저에 비해 장파장 쪽으로 20 nm 이상 치우쳐 있다. 이는 광섬유 구성 유리가 drawing이라는 제조과정을 통해 과냉각 (high quenching) 되었기 때문에 유리구조가 달라져 Nd 이온에 영향을 미치는 전기장의 크기가 달라졌기 때문으로 추측된다. 또한, 발광스펙트럼 life time은 위의 세 가지 발광 모두 440 μs 이었다.

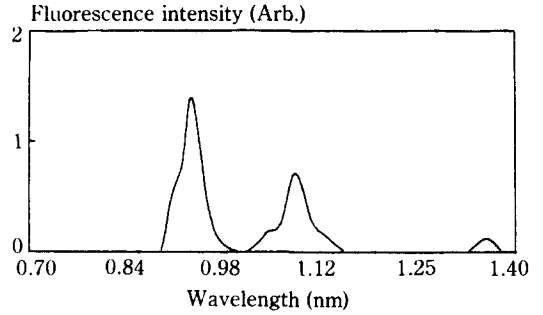


그림 6. Nd 첨가 광섬유의 발광스펙트럼.

IV. 광섬유 레이저

1. 광섬유 레이저의 제작

Nd 가 첨가된 광섬유로 Fabry-Perot 공진기 형태의 레이저를 구성할 때 일반 Nd-YAG 레이저나 Nd-Glass 레이저와는 다소 상이하게 제작된다. 첫째, 여기광원을 수 μm 크기의 광섬유 코아에 효율적으로 입사시키기 위해 현미경 대물렌즈(배율 $\times 10$ 혹은 $\times 20$)를 사용하는데, 이 렌즈들은 초점 거리가 짧기 때문에 가능한 한 얇은 레이저 거울을 사용하는 것이 좋다. 둘째, 여기광에 의해 광섬유 코아내에서 발생한 발광이 코아와 클래딩의 경계면에서 계속 반사되어 빛이 퍼지지 않고 광섬유내에서 계속 진행하므로 광섬유 레이저 거울을 광섬유 양 끝단에 직접 부착하여 공진기를 구성한다. 셋째, 레이저 거울은 여기광을 잘 투과시키고 발진파장에서는 반사가 잘 되는 dichroic 거울을 사용해야 한다. 이와 같은 조건을 만족시키기 위해 본 실험에서는 두께가 0.1 mm, 여기광원의 파장인 514.5 nm에서 80% 투과율을 지니며, 발진 파장에서 99% 반사율을 가지는 dichroic 레이저 거울을 사용하였다. 또한, 광섬유의 양 끝단은 깨끗하게 연마되어야 하는데, 광섬유의 외경이 120 μm 내외이므로 이를 그대로 연마할 수 없어 외경 7 mm, 내경 150 μm 인 유리관 속에 에폭시로 광섬유를 고정시킨 뒤 연마하였다. 연마된 면 위에 접착제로 직접 레이저 거울을 부착하는데, 광섬유 끝단과 거울 사이에 공기층이 있으면 이 부분에서 Fabry-Perot etalon이 형성되어 출력 레이저의 빛살 모양이 나빠지므로 유의해야 한다.

2. 광섬유 레이저의 발진특성

광섬유 레이저를 구성한 후 그림 7과 같이 장치하여 발진시켰다. 514.5 nm 여기광원을 현미경 대물렌즈(배

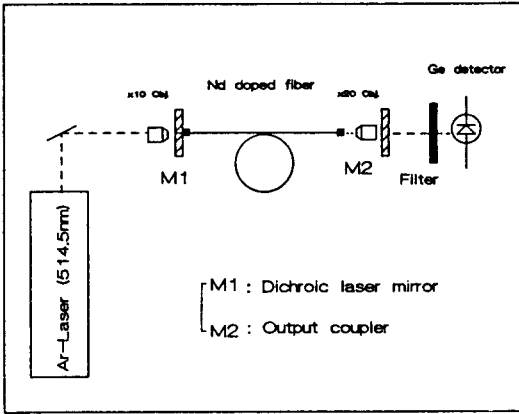


그림 7. Nd 첨가 광섬유 레이저 실험장치도. M : dichroic 레이저 거울.

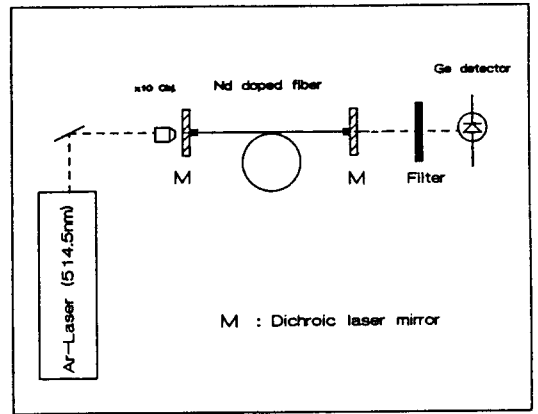


그림 9. Nd 첨가 광섬유 레이저의 출력 스펙트럼 ($P/P_{th}=8.8$).

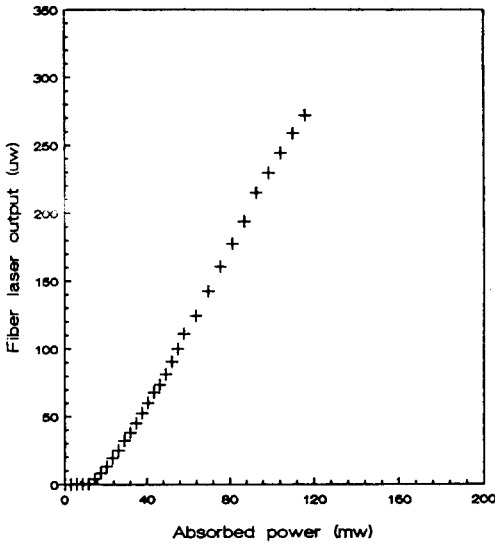


그림 8. $1.096 \mu\text{m}$ 에서 발진되는 Nd 첨가 광섬유 레이저의 발진특성 곡선.

울×10)로 집광시켜 dichroic 레이저 거울을 통해 광섬유 코어에 입사시켰다. 출사광에는 발진된 레이저광과 Nd 첨가 광섬유에 흡수되지 않은 여기광원이 동시에 나오므로 700 nm 에서 cut-on 되는 filter 를 사용하여 여기광원을 제거하였고, 광섬유 레이저의 출력은 Ge 광검출기(Anritsu model ML93A)로 측정하였다. 발진파장에서 광섬유 양 끝단에 부착된 레이저 거울의 반사율이 모두 99%일 경우 여기광원의 세기에 따라 $1.096 \mu\text{m}$ 파장에서 연속 발진하는 광섬유 레이저의 출력변화는 그림

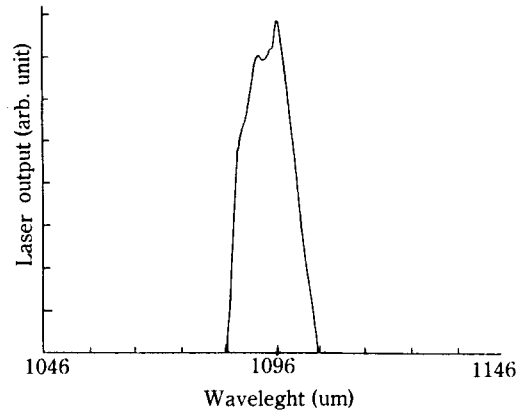


그림 10. 반사율이 다른 출력거울들을 사용하기 위한 광섬유 레이저 실험장치도.

8과 같다. 광섬유 레이저는 514.5 nm 여기광원의 세기가 13 mW 일 때 발진되기 시작하였으며, 106 mW 일 때 최대출력 0.27 mW , 발진선폭 15 nm , 발진 slope 의 효율은 0.25% 가 될을 관찰하였다. 레이저 발진 선폭은 그림 7의 Ge detector 앞에 monochromater 를 설치하여 측정하였으며, 여기광원의 세기가 threshold 의 약 8.8 배 일 때 그림 9와 같이 나타났다.

광섬유 레이저의 출력을 높이기 위해 그림 7의 실험장치도에서 광섬유 레이저 출력단을 부착된 거울을 떼어내고 현미경 대물렌즈(배율×20)와 미세 이동장치에 고정된 거울에 의해 Fabry-Perot 공진기를 그림 10과 같이 구성하였다. 출력거울의 반사율을 99%, 95%, 90%, 67.5%, 59%이었으며 이 때 발진특성 곡선은 그림 11과 같

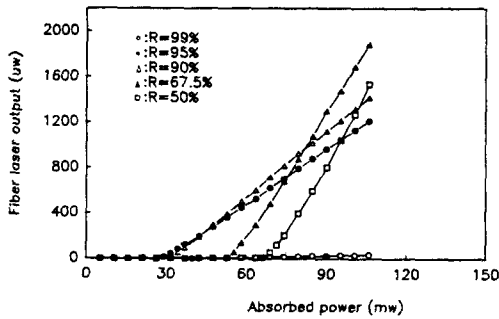


그림 11. 출력거울의 반사율 변화에 따른 발진특성 곡선.

다. 각각의 slope 효율은 0.22%, 0.69%, 0.89%, 1.28%, 1.153%이었으며, 1.096 μm 파장에서 최대의 광섬유 레이저 출력은 여기광원의 세기가 200 mW, 광섬유에 입사된 여기광원의 세기가 106 mW, 출력거울의 반사율이 67.5%일 때, 1.88 mW 이었고, 이 때의 threshold power 는 53 mW 이었다.

Nd 가 첨가된 광섬유 레이저의 횡모드 형태는 그림 7의 실험장치에서 Ge 광검출기 대신 스크린을 설치하여 일반 CCD 카메라로 관찰하였다. 측정된 횡모드 형태는 그림 12와 같이 1.096 μm 파장에서 LP₀₁ 단일모드로 관측되었다. 광섬유 레이저의 횡모드 형태는 사용한 광섬유의 cut-off 주파수와 직접적으로 관련되며, 만약 발진 파장에서 LP₁₁ 모드인 광섬유를 사용한다면 횡모드가 LP₁₁인 광섬유 레이저가 발진된 것이다.

V. 결 론

MCVD 법과 액체 첨가법으로 코아에 Nd 가 첨가된 단일모드 광섬유를 제조하였으며, 514.5 nm 여기광원을 광섬유 코아에 입사시켜 발생하는 형광의 특성을 조사하였다. 광섬유를 외경 7 mm, 내경 150 μm 인 유리관에 고정시켜 연마한 뒤 여기파장에서 투과율이 80%, 발진 파장에서 반사율이 99%, 그리고 두께 0.1 mm 인 dichroic 레이저 거울을 부착시켜 1.096 μm 에서 발진하는 기본 광섬유 레이저를 구성하여 그의 발진특성을 조사하였다. 본 연구의 결과는 참고문헌 4와 11의 결과보다 다소 장파장 쪽으로 치우쳐 발진되었으나 이는 광섬유 제조과정의 열경험의 차이와 광섬유의 파장에 따른 광손실 스펙트럼이 다르기 때문으로 추정된다. 또한, 출력거울의 반사율을 변화시켰을 때의 발진특성 곡선을 측정해 본 결과 출력거울의 반사율이 67.5%일 때 slope

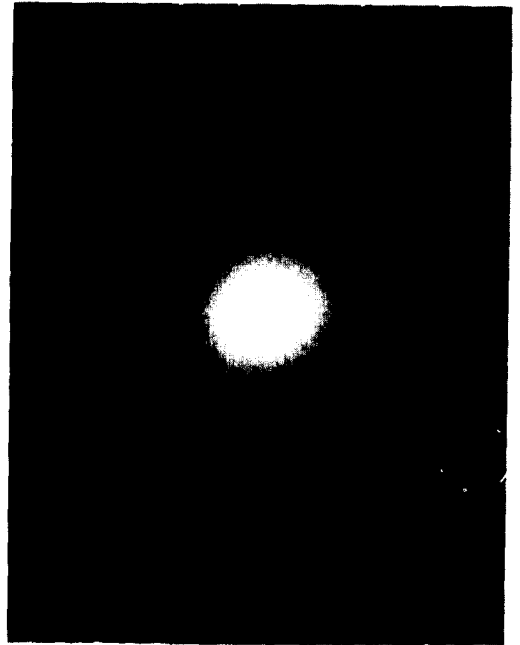


그림 12. 광섬유 레이저 횡모드 형태.

효율 1.28%, 최대 발진출력 1.88 mW 를 얻었다.

이와 같은 연구결과를 토대로 Er 이나 다른 희토류 금속이 첨가된 광섬유 레이저를 제작하거나,⁽¹²⁾ Nd 첨가 광섬유의 경우 1.33 μm 근방의 발광을 크게 증가시킬 수 있는 방법의 개발, 파장 가변 레이저 개발,⁽¹³⁾ 그리고 광섬유 레이저의 센서 등에서의 응용할 수 있는 연구가 계속 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. B. Poole, D. N. Payne and M. E. Fermann, Electron. Lett. **21**, 737 (1985).
- [2] J. E. Townsend, S. B. Pooler, D. N. Payne, Electron. Lett. **23**, 329 (1987).
- [3] S. R. Nagel, J. B. Macchesney and K. L. Walker, IEEE J. Quantum Electron. **QE-18**, 495 (1982).
- [4] R. J. Mears et al., Electron Lett. **21**, 738 (1985).
- [5] S. G. Grubb et al., Electron Lett. **26**, 121 (1990).
- [6] W. J. Miniscalco, Electron. Lett. **24**, 28 (1988).
- [7] 이상배, 조재철, 최상삼, 김영덕, 제 5회 파동 및 레이저 학술 발표회 논문집, 260(1990).
- [8] 『Fiber Optic Sensors 시스템 기술개발 연구』, 한국과학기술연구원 응용광학실 연구보고서 N508(1)-3611-4.
- [9] B. J. Ainslie, S.P. Craig and S.T. Davey, IEEE J.

- Lightwave Technol. **6**, 278 (1988).
[10] D. C. Brown, High peak power Nd:Glass laser systems, Springer-verlag Press, New York, (1981).
[11] I. M. Jauncey et al., Electron Lett. **24**, 24 (1988).
[12] D. C. Hanna et al., Electron. Lett. **25**, 593 (1989).
[13] I. P. Alcock et al., Optics Lett. **11**, 709 (1986).

Fabrication and Lasing Characteristics of Nd Doped Fiber Laser

Sang Bae Lee, Jae Cheol Jo, Sun Ho Kim, Sang Kuk Kim and Sang Sam Choi
Applied Optics Lab., KIST

Byung Yun Kim
Department of Physics, KAIST

Yong Duk Kim
Department of Physics, Sogang University

(Received: July 4, 1990)

The fiber laser was fabricated using Nd doped single mode fiber. The fiber was made by MCVD and solution doping method, and the Fabry-Perot resonator was composed with two dichroic mirrors. It was operated at 1.096 μm with 15 nm bandwidth. When the reflectivity of the output coupling mirror was 67.5%, the maximum output power 1.88 mw and its slope efficiency 1.28%, was obtained.