

## 광섬유격자를 이용하는 진행파형 단일모드 광섬유레이저의 제작과 특성 측정\*

김택중 · 박희갑

전북대학교 물리기술학부

이 동 한

충남대학교 물리학과

(1995년 9월 14일 받음)

광섬유격자와 단방향성 광섬유 loop mirror를 이용하여 단일모드로 발진하는 erbium첨가 광섬유레이저를 구성하였다. 이득매질인 erbium첨가 광섬유를 단방향성 loop내에 둬으로써 레이저광이 이득매질내에서 진행파를 이루도록 하고 loop 밖에서 반사 선폭이 0.2 nm인 광섬유격자로 파장선택적 귀환시켜주는 방식으로 공진기를 구성하였다. 수동형 광섬유 링공진기 형태의 광스펙트럼 분석기를 별도로 구성하여 광섬유레이저의 모드 스펙트럼을 관찰한 결과, 외부 온도변화로 인한 분 단위의 모드 튜닝을 제외하고는 대부분의 시간에 안정적인 단일모드 및 단일편광 상태의 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

### I. 서 론

단일모드 광섬유레이저는 매우 좁은 스펙트럼 선폭을 얻을 수 있는 장점으로 인하여 미래의 광통신과 광센서용의 유망한 광원으로서 많은 연구가 이루어져 왔다.<sup>[1,5]</sup>

일반적으로 레이저가 안정적인 단일모드로 발진하기 위해서는 레이저광이 이득매질내에서 진행파(travelling wave)의 형태를 가지도록 함으로써 단일모드 발진을 저해하는 공간적 hole burning이 생기지 않도록 해야 한다. 그러나 가장 단순한 공진기 구조인 Fabry-Perot형 공진기에서는 레이저광이 공진기내에서 정상파(standing wave)를 이루게 되어 공간적 hole burning을 피할 수 없다. 따라서 단일모드 광섬유레이저는 주로 링레이저 방식이 주종을 이루어 왔다.<sup>[1,3]</sup>

최근에 Ge이 첨가된 광섬유 코어내에 특정 파장의 자외선 광을 강하게 조사시켜 영구적인 굴절률 변화를 유도시키는 방법에 의해 광섬유 코어내 주기적 굴절률 격자(intracore periodic index grating, 이하 줄여 광섬유격자라 함)가 개발되었다.<sup>[6]</sup> 이러한 광섬유격자는 외전상 보통 광섬유와 같은 형태를 가지고 다양한 선폭의 반사필터 역할을 하며, 격자광섬유를 잡아 늘임으로써

비교적 넓은 범위에 걸쳐 반사파장의 가변이 가능하다는 장점이 있다.

이러한 광섬유격자를 사용하면 광섬유레이저를 매우 단순한 형태로 제작할 수 있는데, 수 cm 정도의 짧은 길이의 능동광섬유 양단에 광섬유격자를 형성시켜 단일모드 레이저 발진을 이룬 예가 보고된 바 있다.<sup>[4]</sup> 이것은 공진기 길이를 매우 짧게 하여 광섬유격자의 반사파장 대역 내에 단 하나의 모드만이 존재하도록 한 것인데, 길이의 제약 때문에 큰 출력을 얻지 못하는 단점이 있다. 한편, 광섬유격자는 기본적으로 반사형 필터이므로 링레이저 구조에 직접 적용하기 어려운 측면이 있다. 따라서 광섬유격자를 이용하여 단일모드 광섬유레이저를 구성하기 위해서는, 광섬유격자로부터 반사에 의해 레이저광의 귀환(feedback)이 이루어지되 이득매질 내에서는 진행파가 되도록 공진기를 적절히 구성할 필요가 있다.

본 논문에서는 단방향성 광섬유 루프(unidirectional fiber loop) mirror<sup>[5]</sup>와 광섬유격자를 이용하여 단일모드로 발진하는 erbium첨가 광섬유레이저를 구성하였다. 이득매질인 erbium첨가 광섬유를 단방향성 loop 내에 둬으로써 erbium첨가 광섬유내에서 레이저광이 진행파가 되도록 하고, 광섬유격자를 이용하여 loop 밖에서 파장 선택적으로 귀환시켜주는 방식으로 레이저를 구성

\*이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

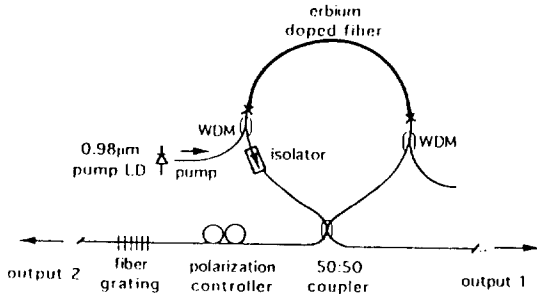


그림 1. 광섬유레이저 공진기의 구성도.

하였으며 출력특성과 단일모드 발진특성을 측정하였다.

## II. 광섬유레이저의 구성

광섬유레이저의 구성도는 그림 1과 같다.

레이저 공진기의 구성은 Sagnac loop와 일견 유사해 보이나, loop 내에서 빛이 한 방향으로만 진행하도록 광isolator가 들어 있으므로 엄밀한 의미에서는 Sagnac loop가 아니며 단방향성 loop일 뿐이다. Loop는 1.55 μm 파장에서 50 : 50의 결합비를 갖는 방향성 광섬유결합기(directional fiber coupler)를 이용하여 구성되었으며, 광isolator는 광섬유 pigtail이 부착되고 입사편광 상태에 무관하게 동작하는 것으로서 1.55 μm 파장에서 순방향 삽입손실 0.7 dB, 역방향 손실 35 dB의 특성을 가지고 있다. Loop내에는 광isolator와 함께 이득매질인 erbium 첨가 광섬유(erbium-doped fiber, 이하 줄여서 EDF라 함)가 들어 있는데, 레이저광이 이득매질 내에서 정상파를 이루지 않도록 되어 있다.

사용된 EDF는 erbium의 첨가밀도가 약 800 ppm이고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 함께 첨가된 것으로서 길이는 7 m이며, 제조사의 규격에 의하면 코어의 직경은 2.6 μm, 코어-클래딩간의 굴절률차는 0.032, 모드 필드 직경은 3.6 μm이다. 또한 1.53 μm 파장과 0.98 μm 파장에서의 최대 흡수율은 각각 12 dB/m, 3 dB/m이다. EDF의 여기광원으로서 0.98 μm 파장의 고효율 레이저 다이오드(laser diode, 이하 LD라 함)를 사용하였다. 여기 LD로부터의 여기광은 광섬유 pigtail이 달린 필터형의 0.98/1.55 μm WDM(wavelength division multiplexer)을 통해 loop 내로 결합되고 EDF 내로 입사된다. EDF의 뒷단에서 또 하나의 WDM을 사용하여 EDF를 투과해 나온 잔여 여기광을 제거하였다.

방향성 광섬유결합기의 loop 바깥쪽 두단중 한쪽에 광섬유격자를 융착접속시켜 반사경으로 사용함으로써 loop mirror와 함께 공진기를 구성하였다. 광섬유격자가

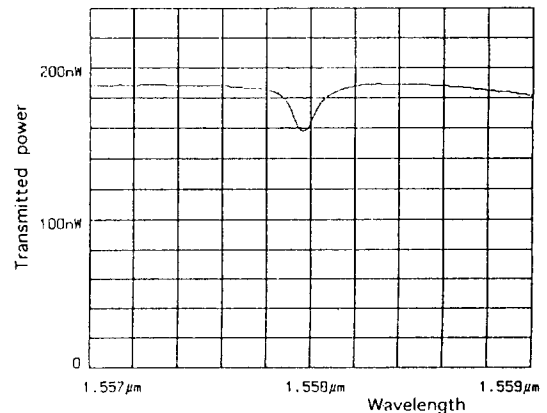


그림 2. 실험에 사용된 광섬유격자의 투과 특성(수평축: 0.2 nm/div.).

광섬유의 한 측면으로부터의 자외선 노광에 의해 만들어지므로 다소의 복굴절 성질을 가질 것으로 생각되어 loop와 광섬유격자사이의 광섬유 부분에 편광조절기를 두어 광섬유격자에 입사하는 레이저광의 편광상태를 조절하였다.

실험에 사용된 광섬유격자의 투과 특성은 그림 2와 같다. 그림 2는 별도의 EDF를 광펌핑하여 이로부터 방출되는 ASE(amplified spontaneous emission) 광을 광원으로 삼아 광섬유격자에 입사시키고, 광섬유격자를 통과하여 나온 빛의 스펙트럼을 파장분해능이 0.1 nm인 회절격자 분광기(grating spectrometer)로 측정한 결과이다. ASE 광원의 스펙트럼은 그림 2의 파장대역에서 변화가 3% 이내로 매우 작은 것을 확인할 수 있었으므로 그림 2의 결과는 광섬유격자의 투과율을 근사하게 나타내는 것으로 생각된다. 또한, 광섬유격자에서의 손실은 접속손실외에는 무시할 만 하므로 투과되지 않은 빛은 거의 대부분 반사되는 것으로 간주할 수 있다. 그림 2의 결과에서 투과율이 최소가 되는 파장, 즉 반사율이 최대인 파장은 약 1.558 μm이며 이 때 반사율은 15% 정도이고, 반사대역의 선폭이 0.2 nm 정도임을 볼 수 있다. 따라서 이 광섬유격자가 파장 선택적인 부분반사경의 역할을 하게 되며 1.558 μm 파장에서 귀환되어 레이저 발진이 이루어진다.

레이저의 출력은 그림 1에서 출력단 1과 2의 양쪽에서 나오는데, 특성 측정시에 광섬유 끝단으로부터의 반사광이 레이저 특성에 영향을 주지 않도록 각 출력단에 광isolator를 부착시켰다. 그림 1에서 나타난 모든 소자는 광섬유 상태이거나 또는 광섬유 pigtail이 부착된 상태로서, 접속은 접속점에서의 산란이나 반사를 최소화 하기

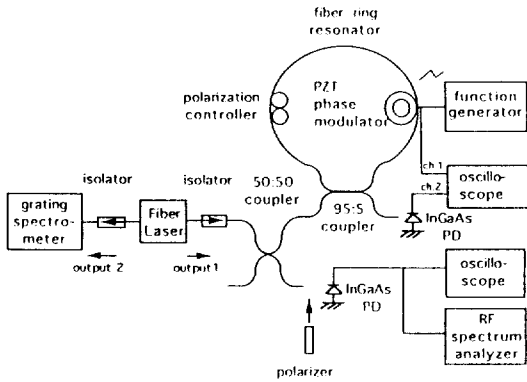


그림 3. 모드 스펙트럼 특성 측정계의 구성도.

위하여 모두 용착접속(fusion splicing)하였다. 그리고 외부로부터의 온도변화나 진동으로 인한 영향을 줄이기 위해 레이저 공진기와 측정용 광섬유 공진기(III절 참조)를 모두 스티로폼 상자안에 넣어 실험하였다.

구성된 광섬유레이저 공진기의 일주길이(round-trip length)는 광섬유격자로부터 출발하여 loop를 돌아 나와 다시 광섬유격자로 돌아오기까지 광섬유상의 거리로 18.6m였다. 이 공진기 길이는 레이저가 다중 종모드로 발진할 경우를 가정하였을 때 이웃한 종모드간의 주파수 간격 10.8 MHz에 해당한다.

### III. 특성 측정계의 구성 및 측정결과

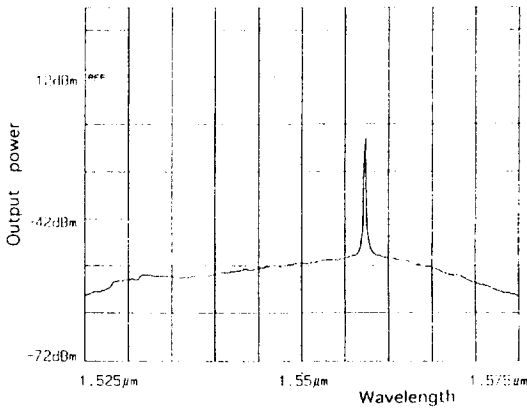
광섬유레이저 스펙트럼 출력의 특성을 측정하기 위하여 그림 3과 같이 측정계를 구성하였다. 특성 측정시에 광섬유 단면으로부터 반사광이 역류하여 레이저의 특성이 영향받을 것을 막기 위하여 레이저의 두 출력단에 각기 광isolator를 용착접속시켰다. 두 출력단중 한 쪽에서는 회절격자를 사용하는 분광기로 출력 파장을 측정하였다. 그러나 이 장비는 파장의 분해 한계가 0.1 nm에 불과하므로 광섬유레이저의 발진모드 특성을 조사하기 위해서는 더욱 좁은 선폭의 스펙트럼을 분해할 수 있는 별도의 광스펙트럼 분석기가 필요하다. 광섬유레이저의 종모드 간격이 10.8 MHz이고 단일모드로 발진할 경우 수~수백 KHz의 선폭이 예상되는데, 이러한 모든 스펙트럼을 측정하기 위해서는 매우 높은 finesse (~1000 이상)를 가지는 안정된 간섭계가 바람직하다. 그러나 본 연구에서는 그러한 간섭계를 구할 수 없었으므로 광섬유레이저와는 별도로 수동형의 광섬유 링공진기를 구성하고 내부 위상변조하여 공진주파수를 주사 시킴으로써 광섬유레이저의 발진모드를 관찰하였다.

광스펙트럼 분석기로서의 광섬유 링공진기는 그림 3과 같이 95:5의 결합비율을 갖는 fused coupler 형태의 방향성결합기를 사용하여, 결합기의 양단에 적정 길이의 일반용도 단일모드 광섬유를 넣고 용착접속하여 구성하였다. 이때 링공진기 입력단으로 입사한 광 power의 일부(5%)만이 링 내부로 결합되며, 공진이 이루어지지 않는 경우에는 대부분이 출력단으로 빠져 나오게 된다. 그러나, 공진이 이루어지는 경우에는 공진기 내부의 빛의 세기는 보강간섭으로 인해 증가하고 출력광은 소멸간섭에 의해 거의 상쇄된다. 방향성결합기에서의 결합비율  $\kappa$ 가 매우 작고 결합기에서의 손실 외에 공진기내에서의 다른 손실 요인을 무시하는 경우에 이 광섬유공진기의 finesse는  $F \approx \frac{\pi\sqrt{1-\kappa}}{\kappa}$ 로 주어진다.<sup>[7]</sup> (참고문헌[7]과 구성방식의 차이 때문에 [7]에서의  $1-\kappa$ 이 본 논문에서  $\kappa$ 에 해당함). 본 실험에서 광섬유공진기의 길이는 10.3 m이므로 굴절률을 1.5라 할 때 FSR은 19.4 MHz이고, finesse는  $\kappa=0.05$ 를 대입하면 약 63으로 계산된다. 따라서, 스펙트럼 선폭의 분해한계 기대치는 약 300 kHz가 된다.

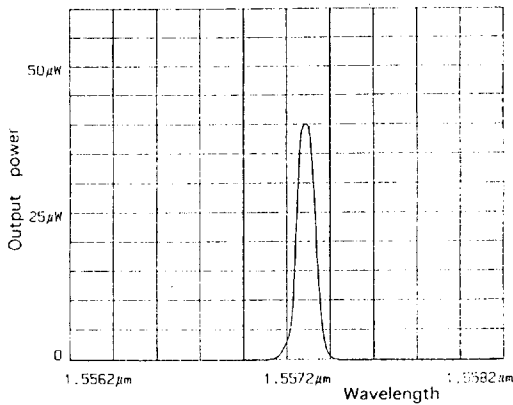
광섬유 링공진기의 공진주파수를 변화시키기 위하여 공진기내에 PZT 위상변조기를 두었다. 위상변조기는 원통형 PZT에 광섬유를 약 40회 감았으며, 신호발생기로부터 100 Hz 정도의 톱니파로 구동하여 진폭 10V 이하에서  $2\pi$  이상의 위상변조가 가능하였다. 한편 공진기를 구성하는 광섬유가 일반 단일모드 광섬유이므로 공진기를 따라 진행하면서 빛의 편광상태가 변화하는 데, 링에 입사하는 빛의 편광상태와 한바퀴 진행한 후의 편광상태가 서로 직교하면 간섭이 일어나지 않으므로 공진기내에 편광조절기를 두어 방향성 결합기에 입사되는 두 빛의 편광상태를 일치시켰다. 또한, 공진기의 출력단에서 InGaAs PIN photodiode로 출력신호를 검출하여 오실로스코프로 스펙트럼 파형을 관찰하였다.

한편, 광섬유레이저 출력의 일부는 50:50 결합기로 뽑아내어 또 다른 InGaAs PIN photodiode로 검출하여 오실로스코프와 RF 스펙트럼 분석기로 맥놀이(beat) 파형의 존재여부를 관찰하였으며, photodiode 앞단에 편광기를 넣어 편광모드간의 맥놀이 여부도 관찰하였다.

그림 4는 광섬유레이저의 발진파장 스펙트럼을 측정된 결과이다. 0.1 nm 분해능의 회절격자 분광기로 측정된 것인데 1.557  $\mu\text{m}$  부근에서 발진하고 있음을 볼 수 있으며, 그림 4(b)를 보면 분광기의 분해한계에 의해 선폭 측정이 제한되고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서 측정된 발진파장이 그림 2에서의 광섬유격자의 최대 반사파장과



(a)



(b)

그림 4. 광섬유레이저의 발진파장 스펙트럼  
(a) 수평축: 5 nm/div. (b) 수평축: 0.2 nm/div.  
(분해한계: 0.1 nm).

0.7 nm 정도 차이를 보이는 데 이는 계측기의 재현성 문제로 인한 것으로 생각된다.

그림 5는 여기 LD power 변화에 따른 광섬유레이저 출력 power를 출력단 1과 출력단 2에서 각각 측정된 결과인데 문턱치 여기 power가 약 15 mW임을 알 수 있다. 여기서, 여기 power는 0.98 μm 파장의 여기 LD pigtail로부터 나오는 power를 의미하며 EDF에 실제로 결합된 여기 power는 측정할 수 없었다. 본 실험에서 광섬유격자가 부분 반사경의 역할을 하므로 광섬유격자를 투과하여 출력이 나오고 있으나, 100%의 반사율을 가진 광섬유격자를 사용하고 광섬유결합기의 결합율을 최적화하여 다른 한쪽의 출력만을 취하면 출력효율을 더욱 높일 수 있을 것이다.

광섬유레이저 출력을 광섬유 링공진기를 통과시켜 모

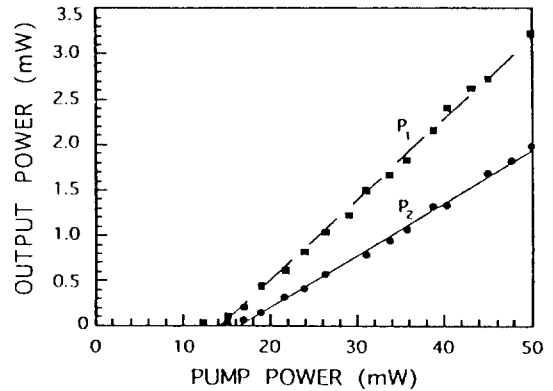


그림 5. 광섬유 링공진기 power에 따른 출력 특성  
(P1: 출력단 1, P2: 출력단 2)

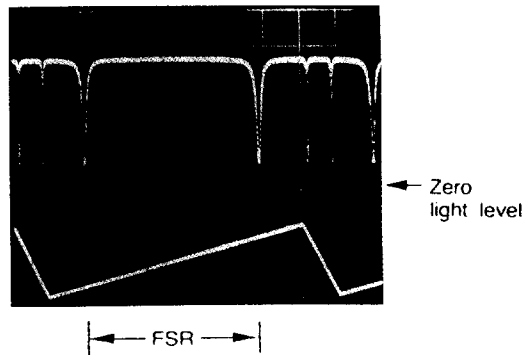


그림 6. 광섬유 링공진기를 이용한 모드 스펙트럼 측정 결과  
(위 파형: 링공진기의 출력 파형, 아래 파형: PZT 위상 변조기에 가해진 전압 파형 FSR=19.4 MHz)

드 스펙트럼을 측정된 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 사진에서 위의 파형은 광스펙트럼 분석기로 사용된 공진기의 출력을 photodiode로 검출한 오실로스코프 파형이다. 사진에서 아래의 톱니 파형은 공진기내 PZT 위상변조기에 가해진 전압 파형을 나타낸다. PZT에 가해지는 전압이 단조 증가하는 동안에 출력 파형이 반복되는 주기가 이 공진기의 FSR에 해당하는데 본 실험에서는 19.4 MHz이다. 광섬유 링공진기에 입사하는 빛이 공진기의 공진주파수가 아닌 상태에서는 투과율이 거의 1에 가까우나 공진 상태에서는 출력광 power level이 작아지게 된다. 그림 6에서 한 FSR내에 하나의 peak만이 나타나고 있는데 이는 단 하나의 종모드만이 발진하고 있음을 보여주는 것이다. 사진의 결과로부터 선

폭을 추정하면 수백 kHz 정도로 나타나 보이지만, 사진의 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 이 공진기의 실제 finesse가 앞에서 계산에 의한 기대치에 거의 접근하는 것으로부터 미루어 볼 때 광섬유레이저의 실제 선폭은 이보다 훨씬 좁을 것으로 생각된다.

한편, 광섬유레이저의 출력을 링공진기를 통하지 않고 응답속도가 빠른 photodiode로 직접 받아 검출한 신호의 스펙트럼을 RF 스펙트럼 분석기로 측정하였다. 그 결과, 대부분의 시간에 종모드간의 맥놀이 주파수 스펙트럼을 관찰할 수 없었으며, 단지 dc 성분과 약간의 이완진동 (relaxation oscillation) 성분의 스펙트럼만이 존재하였다. 그러나 본 실험에서 외부진동과 온도변화에 의한 영향을 완전히 차단하지 않았으므로 비교적 안정된 상태에서도 1~2분 간격으로 모드 뺨(mode hopping) 현상이 존재하였으며 그 과정에서 순간적으로 두개의 모드가 발전하면서 두 모드의 맥놀이 주파수 스펙트럼이 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.

광섬유레이저 출력에 편광에 따른 모드가 존재하는지 확인하기 위하여, 레이저 출력과 photodiode 사이에 편광기를 넣어 돌리면서 편광모드간의 맥놀이 주파수 스펙트럼이 존재하는지 오실로스코프 파형과 RF 스펙트럼 분석기를 통하여 관찰하였다. 그러나 편광모드간의 맥놀이 스펙트럼을 관찰할 수 없었으며, 따라서 레이저의 출력은 단 하나의 편광상태만을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 광섬유격자와 광섬유결합기에 존재하는 약간의 편광의존성 때문인 것으로 생각된다. 이 광섬유 레이저의 출력은 일반적으로 타원편광 상태이며, 레이저 공진기내 편광조절기를 조절함으로써 거의 선편광 상태인 출력을 얻을 수 있었다.

#### IV. 결 론

단방향성 loop 형태로 구성된 진행파형 erbium첨가 광섬유레이저에 반사대역 선폭이 약 0.2 nm인 광섬유격자를 사용하여 loop 외부에서 파장 선택적으로 귀환시켜 줌으로써 단일모드 발진을 얻을 수 있었다. 광섬유레이저와는 별도로 수동형의 광섬유 링공진기 형태의 광스펙트럼 분석기를 구성하여 모드 스펙트럼을 관찰한 결과, 대부분의 시간에 안정된 단일모드 특성을 나타내며 단

일편광 상태의 출력을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 온도변화등 외부요인으로 인하여 모드의 주파수가 변화하면서 분 단위의 모드뺨(mode hopping)도 존재하였다. 광섬유loop와 광섬유격자의 온도변화를 안정시키고 가능한 한 loop 길이를 짧게 하면 모드의 안정성이 더욱 향상될 것으로 기대된다. 한편, 광섬유격자와 포화흡수체를 이용하는 유사한 연구결과가 본 논문의 실험 후에 발표되었는데<sup>[8]</sup> 이러한 방식으로 모드 특성을 더욱 개선할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 출력의 최적화는 시도하지 않았으나 100% 반사율을 가진 광섬유격자를 사용하고 다른 한쪽의 출력만을 취한다면 출력을 더욱 높일수 있을 것이다. 그리고, 레이저광이 공진기를 한바퀴 돌 때마다 loop를 구성하는 광섬유결합기에서 손실이 발생하는데 그 결합비를 바꾸어 줌으로써 출력도 최적화시킬 수 있을 것으로 생각한다.

#### 감사의 글

광섬유 접속과 실험에 도움을 주신 ETRI의 광파통신 연구실과 광통신연구실원 여러분께 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. R. Morkel, G. J. Cowle and D. N. Payne, *Electron. Lett.* **26**, 632 (1990).
- [2] K. Iwatsuki, H. Okamura, and M. Saruwatari, *Electron. Lett.* **26**, 2034 (1990).
- [3] N. Park, J. W. Dawson, and K. J. Vahala, *Opt. Lett.* **18**, 879 (1993).
- [4] J. L. Zyskind, V. Mizrahi, D. J. Digiovanni, and J. W. Sulhoff, *Electron. Lett.* **28**, 1385 (1992).
- [5] G. J. Cowle and D. N. Payne, *Electron. Lett.* **27**, 230 (1991).
- [6] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, *Opt. Lett.* **14**, 823 (1989).
- [7] L. F. Stokes, M. Chodrow, and H. J. Shaw, *J. Lightwave Technol.* **1**, 110 (1983).
- [8] Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh, R. I. Laming, and D. N. Payne, *Opt. Lett.* **20**, 875 (1995).

## **Construction and Characterization of Travelling Wave Type Single Mode Fiber Laser Using a Fiber Grating**

Taek Jung Kim and Hee Gap Park

*School of Physics and Technology, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea*

Dong Han Lee

*Department of Physics, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea*

(Received: September 14, 1995)

A single-mode erbium-doped fiber laser is constructed by using a intracore fiber Bragg grating and a unidirectional fiber loop mirror. The laser cavity is designed in such a way that the laser beam forms a travelling wave in the gain medium by placing the erbium-doped fiber inside the unidirectional loop and that the wavelength-selective feedback is made from the outside of the loop by a fiber grating with 0.2 nm reflection linewidth. An additional fiber ring resonator is constructed and used as an optical spectrum analyzer to observe the variation of the laser mode spectra. As the result, relatively stable single mode, single polarization output is observed for the most of the time except some mode hoppings in minute scale due to environmental temperature variations.