

파장 가변 어븀 첨가 광섬유 DFB 레이저

윤 흥 · 조규만

서강대학교 물리학과

Ⓣ 121-110 서울시 마포구 신수동 1번지

이상배* · 김상혁 · 최상삼

한국과학기술연구원 광기술연구센터

Ⓣ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

(2000년 8월 28일 받음, 2000년 11월 22일 수정본 받음)

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자를 공진기로 사용하는 파장 가변 광섬유 DFB레이저를 구현하였다. 사용된 광섬유 브래그 격자는 3 cm의 Er^{3+} 첨가 광섬유에 새겨졌고 브래그 공명파장은 1559.4 nm이다. 단일 모드 동작과 낮은 문턱 펄프를 위해 UV 재조사 방법을 통하여 $\lambda/4$ 위상천이를 주었다. 제작된 레이저는 230 μW 파워의 단일 모드 발진을 하며 35 kHz의 선폭을 갖는다. 또한 광섬유 격자를 PZT로 조절하는 광섬유 인장기로 인장하여 레이저의 발진 파장을 3 nm까지 가변할 수 있었다.

OCIS codes : 060.0060, 140.0140.

I. 서 론

안정되고 좁은 선폭을 가진 단일 모드 광원은 수신 측에서 수신감도를 개선할 수 있고 전송 파장 대역을 효율적으로 사용할 수 있기 때문에 파장 분할 다중화 방식(WDM) 광통신 시스템과 외부 변조에 의한 대용량 전송 시스템에 필수적인 능동소자이다. 현재 광통신의 단일 모드 광원으로 사용하고 있는 소자는 반도체 DFB 레이저인데 이를 대체할 수 있는 광원 중 하나가 광섬유 레이저이다.^[1-3] 광섬유 레이저는 자체가 특정 파장에서 이득을 얻을 수 있는 원소가 첨가된 광섬유를 이득 매질로 사용하는 광섬유 소자이므로, 광섬유에 부착이 용이하고 간단하며 다양한 응용과 전광 소자로의 확장이 용이하다. 특히 특정 대역을 선택할 수 있는 광섬유 브래그 격자의 등장으로 단일 모드 광섬유 레이저의 획기적인 발전을 이루었다. 광섬유 레이저에 광섬유 격자의 도입은 요구되는 구성 소자를 최소로 줄일 수 있기 때문에 단일 모드 광섬유 레이저의 디자인을 간소화할 수 있다. 광섬유 격자는 좁은 대역의 파장을 선택할 수 있는 좋은 반사경의 역할을 하므로 광섬유 격자를 사용한 광섬유 레이저는 낮은 잡음 지수, 좁은 선폭, 뛰어난 파장 선택성과 정확성의 장점을 가지고 있다. 또한 광섬유 브래그 격자를 압축 혹은 인장하여 발진 파장을 조절할 수 있다.^[4] 광섬유 격자를 이용한 단일 모드 광섬유 레이저는 DBR (distributed bragg reflector) 구조, DFB(distributed feedback) 구조, Ring 구조 등과 같은 3가지의 구조가 있다. DBR방식^[5]은 일반 레이저와 같이 가운데 이득 매질을 두고 양끝에 동일한 주기의 광섬유 브래그 격자를 반사경으로 쓰는 방식이며, Ring 방식^[6]은 공진기를 링의 형태로 구성하여 광이 한쪽방향

으로만 진행하도록 한 구조이다. DBR 구조에서는 광이 standing wave로 존재하는 반면 Ring 구조에서는 traveling wave로 존재하므로 DBR 구조의 spatial hole burning을 제거할 수 있다. 이 방식은 광섬유 격자 외에도 다양한 파장 선택 필터와 이득 매질을 사용하여 구성할 수 있으며 연속발진 단일 모드 광섬유 레이저 외에도 고반복률의 모드 잠금 레이저(mode locked laser)를 구성할 수 있어 광시분할 다중화(optical time division multiplexing-OTDM) 방식의 광원으로 사용한다. 이 논문에서 구현한 DFB 구조는 공진기의 궤환 요소(feedback component)가 공진기 전체에 분포되어 있는 구조이다. 앞의 두 방식에 비해 이 방식은 광섬유 격자를 하나만 사용하고 광섬유 격자 자체가 공진기이므로 수 cm의 작은 크기로 부피가 작고 안정적이며 일반적인 페브리 페로(Fabry-parot) 레이저보다 강한 측모드 저하(side mode suppression)를 가진다.

본 논문에서는 이러한 광섬유 격자를 이용한 단일 모드 광섬유 레이저 가운데 광섬유 격자를 DFB 구조로 구현한 좁은 선폭의 광섬유 DFB 레이저를 제작하여 그 특성을 측정하였다. 또한 격자의 주기를 PZT 광섬유 신장구를 통해 조절하여 파장 가변 레이저를 구현하였다.

II. 이론적 배경

이득매질 내부에 격자가 존재하는 DFB 구조에서는 반사경으로서만이 아니라 공진주파수를 결정하는 필터로 사용된다. 그림 1과 같이 전 길이에 광섬유 격자가 존재하는 유전체 도파로를 가정한다. 도파로 안에서 발생한 광은 격자에 의해 반사가 발생하므로 서로 반대 방향으로 진행되는 두 개의 파동이 존재한다. 격자의 주기를 한번 왕복할때 발생하는 위상변

*E-mail: sblee@kist.re.kr

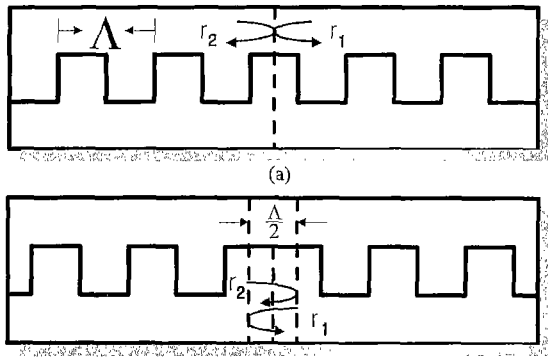


그림 1. (a) 연속적인 격자 구조, (b) $\lambda/4$ 위상천이된 격자 구조.

화가 2의 정수배 근처인 파장을 가지는 빛은 격자에서 발생하는 반사들이 거의 동위상을 가지므로 서로 반대방향으로 진행되는 파동들 사이에서 파워 교환이 심하게 발생한다. 그러나 다른 파장들에서는 격자에서 발생하는 반사가 동위상이 아니므로 반대방향으로 진행되는 파동이 존재하지 않게 된다.

DFB구조를 등가적으로 두 개의 반사경으로 생각하면 각각 양쪽 방향에서 반사되는 작은 파동들이 서로 같은 위상으로 더해져서 중앙으로 진행해온다. 그러므로 최대투과율을 가지기 위해서는 양쪽에서 진행해온 빛들이 중앙에서 동위상이어야 한다. 그러나 그림 1(a)의 경우에는 양쪽에서 진행해온 빛들의 위상이 격자의 중앙에서 봤을 때 한쪽 방향에서 진행되는 파는 소한 매질에서 밀한 매질로 진입하고 반대 쪽에서 진행되는 파는 밀한 매질에서 소한 매질로 입사하므로 여기서의 위상차이를 갖게된다. 이 경우에는 정확하게 브래그 조건에 맞는 파장에서 공진이 발생되지 않고 브래그 공명 파장의 주위 파장에서 공진이 발생한다. 그래서 공진을 위한 문턱 값이 높고 모드들 사이에서 호핑(hopping) 현상이 일어난다. 이 문제를 해결하기 위해 그림 1(b)와 같이 격자 중앙에 $\lambda/2$ 즉 $\lambda/4$ 만큼의 위상천이(phase shift)를 주어 브래그 조건에 맞는 파장에서 단일 모드 발진을 하도록 한다. 위상천이를 주었을 때와 주지 않았을 때의 문턱 발진 이득(threshold gain)을 모드 결합 이론(coupled mode theory)으로부터 다음과 같이 유도하였다.^[7]

이 식으로부터 특정한 격자 결합 세기가 주어질 때 위상천이를 가한 구조가 위상천이를 가하지 않은 구조보다 발진 위상 조건이 맞아 threshold power가 낮게 된다. 예를 들어 격자의 결합세기(L)가 반사율 99%에 해당하는 7의 값을 가질 때 12 dB정도 낮게 된다. 광섬유 DFB 레이저에서 위상천이를 주는 방법은 3가지로 위상천이를 주고자 하는 부분에 온도를 높이는 방법^[8]과 새겨진 격자의 일부분에 UV를 조사하여 위상천이를 주는 방법,^[9,10] 그리고 UV beam을 이동하여 광섬유 브래그 격자를 제작하는 방법을 통하여 위상천이를 주는 방법이 있다.

III. 레이저의 제작 및 특성

광섬유 DFB레이저의 이득 매질로 사용된 1.5 대역에 이득

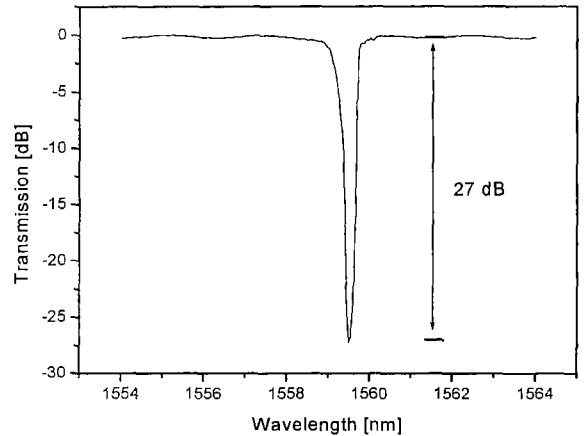


그림 2. 어븀첨가 광섬유에 새겨진 광섬유 격자의 투과 스펙트럼.

을 얻을 수 있는 어븀(Er^{3+} , 원자번호 68, 란타넘계열)^[11] 첨가 광섬유는 1000 ppm 이상의 어븀첨가 농도를 가지며 광섬유 브래그 격자를 새기기 위한 광민감성을 높이기 위해 Ge이 많이 첨가되었다. 광섬유 DFB 레이저에서의 공진기는 광섬유 격자이므로 공진기를 구성하기 위해서 위상마스크 제작 방법으로 KrF 엑시머 레이저를 통하여 248 nm의 UV를 조사하여 어븀첨가 광섬유에 광섬유 격자를 새겼다. 새겨진 격자의 길이는 위상 마스크의 길이에 제한되어 3 cm이며, 주기가 1071 nm인 위상마스크로 새겼을 때, 그림 2에서와 같이 1559.4 nm의 파장에서 -27 dB의 제거 비율 즉, 99.8%의 반사율과 OSA 최대 resolution인 0.05 nm에서 광대역광원의 power level을 기준으로 linear scale에서 반축, log scale에서는 3 dB 만큼 떨어진 위치에서 밴드폭을 측정했을 때 0.4 nm의 FWHM를 가졌으며 격자의 결합세기(κL)는 11.9였다. 일반적인 반도체 DFB 레이저의 결합세기는 3정도인데 이에 비하여 매우 높다.

광섬유 DFB 레이저 구조를 구성하기위해 어븀첨가 광섬유에서 격자가 새겨진 길이 외의 부분은 제거하고 일반 단일 모드 광섬유에 용융접착하였다. 레이저는 WDM 커플러를 통하여 980 nm Pump LD를 주입하여 여기시켰고, Optical spectrum analyzer로 레이저의 발진을 관측하였다. 먼저 위상천이의 효과를 확인하기 위해 열선을 통해 임시적 방법으로 위상천이를 가하였다. 광섬유 격자의 가운데 부분에 지름 2 mm의 열선을 접촉시켜 국부적으로 열을 가하였고 슬라이더스로 가하는 온도를 조절하였다. 상온에서 발진이 되지 않았고 온도가 오르면 굴절율이 증가하므로 위상천이가 유도되어 레이저 발진이 되었다. 온도를 증가시켰을 때 발진을 한 이유는 사용한 어븀첨가 광섬유의 이득이 낮아 온도를 증가하여 공진기의 위상을 맞추었을 때, 발진이 되기 위한 문턱 펌프 파워가 낮아지기 때문이다. 그림 3은 발진 스펙트럼이며, 열선의 온도에 따른 스펙트럼의 변화를 관측한 스펙트럼이다. 62°C의 온도를 가했을 때 발진 파장은 0.05 nm의 분해능으로 측정했을 때 광섬유 격자의 공명 파장과 동일한 1559.4 nm였고 발진 파장은 0.3 nm 이내에서 변했는데 이것은 광섬유의 대역폭이 0.4 nm인 것과 혹은 열선에 의한 주기의 변화에 이유를 들 수 있다.

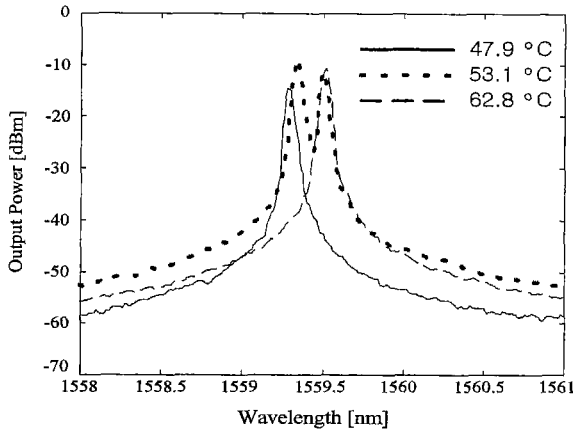


그림 3. 열선의 온도변화에 따른 발진 스펙트럼의 변화(측정분해능 : 0.05 nm).

영구적인 위상천이를 주기위해 UV 제조사 방법(Post UV exposure method)을 사용하였다. 광섬유 격자를 새긴 후 격자의 가운데 부분만 다시 UV를 조사하여 굴절율을 높여 위상천이를 주는 방법이다. 격자 간격을 조절할 수 있는 슬릿을 통해 UV 빛이 슬릿의 간격만큼 통과하게 하여 광섬유 격자의 가운데 부분 4 mm를 조사하여 구현하였다. 위상이 맞아 발진이 되는 순간을 포착하기 위해 UV 레이저는 450 mJ/cm²/pulse의 에너지로 0.5 Hz로 조사하고 980 nm Pump LD를 입사시켜 관측하였다. 대략 10분 정도 조사하였을 때 발진을 하였고 열선에 의해 발진한 스펙트럼과 동일하였다. 발진 파장은 1559.4 nm이고 resolution 0.05 nm의 OSA로 측정된 신호대 잡음 비(signal to noise ratio-SNR)는 50 dB이상으로 측정되었다. 그리고 그림 4과 같이 pump power에 대한 출력 power는 threshold pump power 는 9 mW였으며 최대peak 파워는 -6 dBm 즉, 230 μW였다. Optical spectrum analyzer의 분해능 이하의 선폭은 측정할 수 없기 때문에 더 정확한 선폭을 측정하기 위하여 그림 5와 같은 self-heterodyne 방법^[12]을 사용하였다. 간섭계의 한쪽 팔은 레이저의 공간 간섭길이(coherence length)를 훨씬 초과하도록 12 km의 시간 지연 광섬유를 두었고 다른 쪽 팔에는 음향광학조절기(Acousto-Optic Moulator-AOM)로 광의 주파수를 55 MHz 만큼 이동시킨 후 양쪽 팔의 광의 beat 주파수를 측정하여 선폭을 측정한다. RF

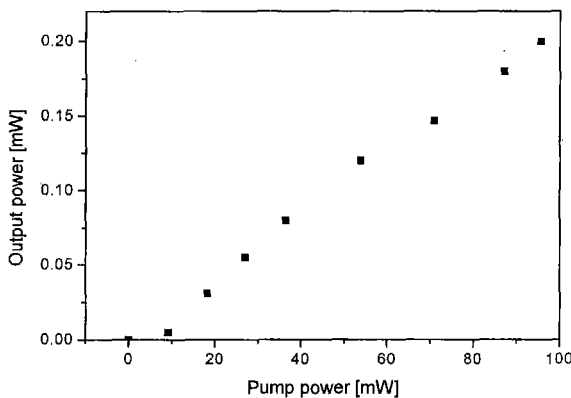


그림 4. 입력 Pump power에 대한 레이저 출력 power.

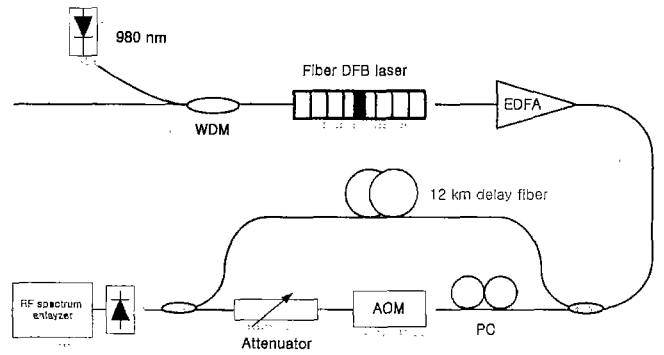
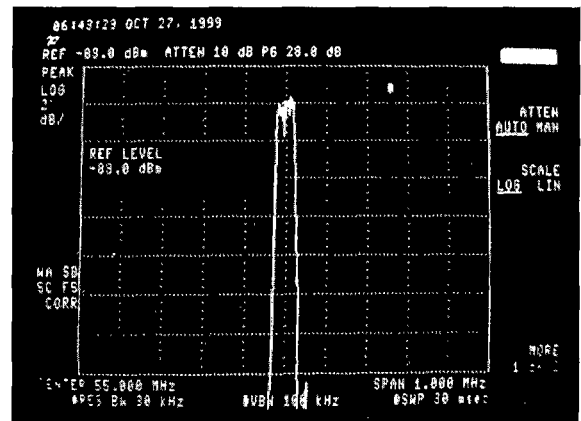
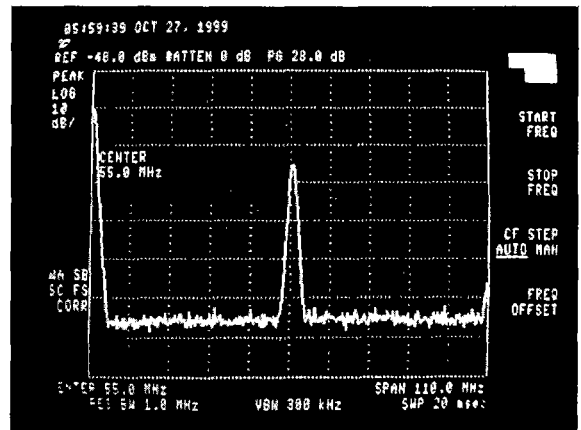


그림 5. Self-heterodyne 방법에 의한 선폭 측정 실험구성도.

spectrum analyzer로 측정된 선폭은 그림 6(a)와 같다. 선폭은 반측폭의 반이므로 35 kHz이다. 이는 선폭이 수십 MHz에 이르는 반도체 DFB 레이저에 비해 월등히 좋은 특성을 가진다. 그림 6(b)는 beating 신호인 55 MHz를 중심으로 110 MHz 범위까지 측정된 스펙트럼이다. 110 MHz근방의 신호는 음향광학조절기의 55 MHz의 두번째 차수의 신호이다. 문턱 펌프에서 최대 펌프까지 동일한 단일모드를 보였으며, RF spectrum analyzer를 통하여 측정된 그림 6(b)로부터 측 모드



(a)



(b)

그림 6. (a) Self-heterodyne 방법에 의해 측정된 선폭(x축: 100 kHz/div, y축: 2 dB/div), (b) 55 MHz beating된 신호(y축 : 10 MHz/div, y축: 10 dB/div).

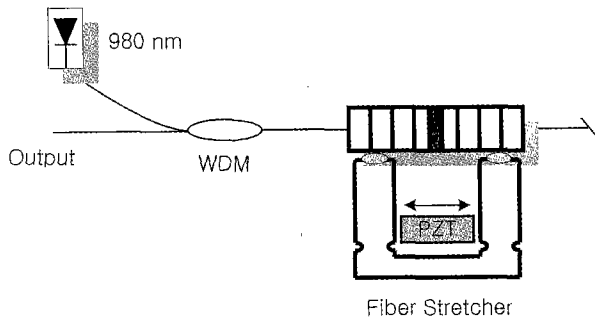


그림 7. 파장 가변 광섬유 DFB 레이저 구성도.

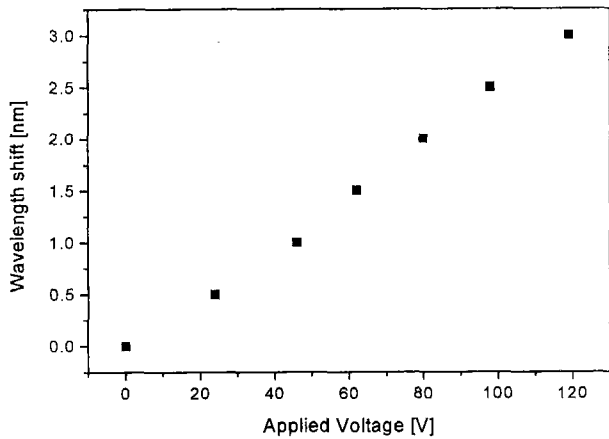


그림 8. 압전소자에 인가한 전압에 따른 발진 파장의 변화.

저하 비율(side mode suppression ratio-SMSR)이 40 dB인 것을 알 수 있다. 다음은 광섬유 격자를 인장(strain) 함으로 주기를 늘려 공진 파장을 바꿔 파장 가변 레이저를 구현하였다. 구성은 그림 7과 같이 광섬유 신장구(fiber stretcher)와 광섬유 DFB 레이저로 구성되어 있는데 광섬유 신장구는 직육면체 모양의 압전소자(piezoelectric transducer, PZT)와 특별히 고안된 탄소강 재질의 신장구로 구성되어 있다. 압전소자 자체는 인가전압에 대한 인장정도가 한계가 있으므로 압전소자가 신장구의 양 팔을 밀면 팔이 벌어짐으로 인장력이 확장된다. 이렇게 구성된 광섬유 신장구는 레이저를 구성하는 광섬유 DFB 레이저의 격자부분을 신장구 양 팔에 예폭시로 부착하였을 경우 1 nm/1000 μ strain의 파장가변 성능을 갖는다. 압전소자에 전기 신호를 인가하여 파장 가변 정도를 조절하였다. 그림 8은 인가전압에 대한 파장 변이로 0.25 nm/10 V이고 최대 3 nm까지 파장을 가변하였다. 그림 9는 발진 파장이 가변되는 스펙트럼이다. 발진 파장은 모드 호핑없이 안정적으로 가변하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 파장 가변 특성을 가진 좁은 선폭의 광섬유 DFB 레이저를 구현하였다. 실험하여 구성한 광섬유 DFB 레이저는 파장 선택을 위한 결합 강도를 최적으로 구성하였으며, 발

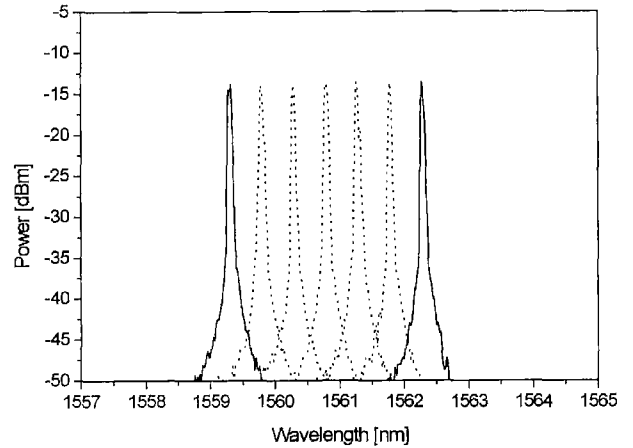


그림 9. 레이저 발진 파장이 가변되는 스펙트럼.

진을 위한 공진기의 위상 조건을 맞추기 위해 격자 가운데 부분에 UV를 다시 조사하여 영구적인 위상천이를 가하였다. 광섬유 DFB 레이저의 선폭은 35 kHz로 일반 반도체 DFB 레이저에 비해 좁은 것으로 측정되었다. 또한 광섬유 격자를 광섬유 신장구로 인장하여 3 nm의 발진 파장 가변범위를 갖는 파장 가변 레이저를 구현하였다. 좁은 선폭, 파장 가변의 특성을 가진 광섬유 DFB 레이저는 WDM 시스템에서 원활한 적용성을 가지고, 분산의 영향을 덜 받으며, 근접 채널의 신호에 대한 누화를 줄일 수 있다는 점에서 현재 반도체 광원의 대체 광원으로서 기대가 된다.

참고문헌

- [1] G. Keiser, *Optical Fiber Communications* (McGraw-Hill, New York, 1991).
- [2] G. A. Ball and W. W. Morey, *Optics Letters* **17**, 420 (1992).
- [3] Victor Mizrahi, David J. DiGiovanni, Robert M. Atkins, Steven G. Grubb, Yong-Kwan Park, and Jean-Marc P. Delavaux, *J. Lightwave Technol.* **11**, 2021 (1993).
- [4] J. T. Kringlebotn, *Electronics Letters* **30**, 972 (1994).
- [5] J. L. Zyskind, *Electronics Letters* **28**, 1385 (1992).
- [6] A. J. Gloag, *Optics Communications* **123**, 553 (1996); Yariv, *IEEE Photonics Technology Letters*, **QE-9**, 919 (1973).
- [7] S. L. McCall and P. M. Platzman, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **21**, 1899 (1985).
- [8] J. T. Kringlebotn, J. L. Archambault, L. Reekie, and D. N. Payne, *Optics Letters* **19**, 2101 (1994).
- [9] G. P. Agrawal and S. Radic, *IEEE Photonics Technology Letters* **6**, 995 (1994).
- [10] J. Canning and M. G. Sceats, *Electronics Letters* **30**, 1344 (1994).
- [11] W. J. Miniscalco, *IEEE Journal of Lightwave Technology* **9**, 234 (1991).
- [12] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications*, pp. 404-407.
- [13] H. Yoon et al., *OECC2000*, 14B4-5, 516 (2000).

Tunable Er³⁺ doped Fiber DFB Laser

Hong Yoon and Kyu Man Cho

Department of Physics, Sogang University, Seoul 100-611, KOREA

Sang Bae Lee[†], Sang Hyuk Kim, and Sang Sam Choi

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, KOREA

[†]*E-mail: sblee@kist.re.kr*

(Received August 28, 2000 ; Revised manuscript received November 22, 2000)

A study of the tunable fiber DFB laser using PZT-stretcher is presented. The device has an laser oscillator by using a fiber Bragg grating at 1559.4 nm written directly into a 3-cm long Er³⁺ doped fiber. Post UV-exposure method to provide the necessary phase shift is used for a single mode operation. The device shows the single mode operation of 230 μ W output power and has a narrow linewidth of 35 kHz. The lasing wavelength of the laser can be tuned in a range of 3 nm by stretching the grating.

OCIS codes : 060.0060, 140.0140.