≪연구논문≫ The Journal of Optical Society of Korea (Korean Edition) Volume 5, Number 2, June 1994

공진기 반사율과 펌프 파워에 따른 어븀 광섬유 레이저의 특성*

박서연 · 이학규 · 김경헌
한국전자통신연구소 기초기술연구부

이 동 한
충남대학교 물리학과

(1994년 1월 20일 받음)

어븀 첨가된 광섬유로 레이저 공진기를 구성하여 공진기의 결합기 반사율과 펌프 파워에 따른 출력 특성을 조사하고, 공진기의 양쪽 거울의 반사율에 따른 레이저 발진 파장의 변화를 어븀 광섬유의 흡수 및 이득 스펙트럼과 공진기 구성 파라미터를 이용한 계산으로 분석하였다. 최대 경사 효율은 양쪽 공진기 거울의 반사율이 100%와 4%일 때 38%이었고, 문턱 펌프 파워는 양쪽 반사율이 4~4%에서 100~90%로 증가함에 따라 7.8 mW에서 5.6 mW로 낮아졌다. 공진기 반사율의 변화 (0.0016~0.9)에 대해 어븀 광섬유의 길이가 15.8 m일 때는 1.558~1.570 μm에서 레이저의 발진이 이루어졌으며, 6 m일 때는 밀도 반전율의 증가로 어븀의 형광 대역의 낮은 영역인 1.532~1.563 μm 사이에서 발진 파장이 형성되었다.

I. 서 론

어븀 첨가된 광섬유를 레이저 매질로 사용하면 어븀이 갖는 넓은 형광 스펙트럼 (fluorescence spectrum) 특성을 이용하여 에너지 천이 준위 $4I_{13/2}$~$4I_{15/2}$로부터 1.5~1.6 μm 사이의 넓은 파장 대역에서 레이저의 발진이 가능하다.[1] 광섬유 레이저는 광섬유를 도파로로 이용하는 도파로형 공명 소자로서 잘 발달된 실리카 제조 기술이 저손실과 고정밀도를 제공하고, 작은 코아 내에 높은 파워 밀도를 유지하므로 낮은 문턱 파워와 높은 이득을 갖는다. 또한 주변 광섬유 소자 기술의 발달로 현재 광통신 및 광섬유 센서용 광원으로 널리 이용되고 있다.[2] 본 논문에서는 어븀 첨가 광섬유의 흡수 및 이득 스펙트럼 특성을 조사하고,[3] 공진기 구성 파라미터를 이용하여 공진기의 양쪽 결합기의 반사율과 어븀 광섬유의 길이에 따른 광섬유 레이저의 발진 특성에 대한 실험 결과에 대해 논하고자 한다.

II. 어븀 광섬유 레이저

어븀 (Er^{3+})은 3준위 시스템(3 level system)으로 그림 1과 같은 에너지 준위도를 갖는다. 펌프 여기 상태 흡수 (excited state absorption)가 없다고 가정하면 비율 방정식(rate equation)은

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= -N_1R_{13}+N_2/\tau_{21}+N_2W_e-N_1W_a \\ dN_2/dt &= -N_2/\tau_{21}+N_3/\tau_{32}-N_2W_e+N_1W_a \\ dN_3/dt &= -N_3/\tau_{32}+N_1R_1 \end{aligned} \quad (1)$$

이다. 여기서 $N_i(i=1, 2, 3)$는 각 준위의 밀도, R_{13}는 펌프 비율, τ_{21}와 τ_{32}는 준위간 수명(life time)이고, W_a와 W_e는 신호광의 흡수 및 방출 확률을 나타낸다.[4]

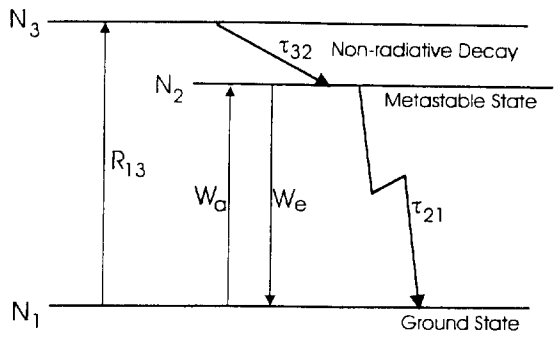

그림 1. 3 준위계의 에너지 준위.

* 본 연구는 체신부와 한국통신의 기초연구사업비에 의해 후원되었음.

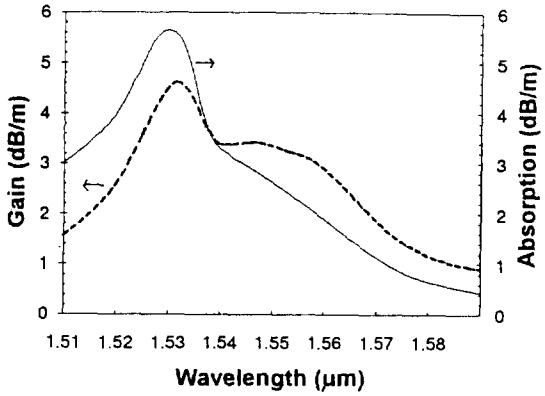

그림 2. 어븀 첨가 광섬유의 이득 및 흡수 스펙트럼.

정상 상태에서 식 (1)의 $dN_i/dt=0$ ($i=1$, 2, 3)이고, 어븀 이온의 경우 τ_{21} (약 10 ms)≫τ_{32} (약 1 μs)이므로 레이저의 발진을 위한 밀도 반전 조건으로부터 펌프 문턱 파워는

$$I_p^{th}=h\nu_p/\sigma_A\,\tau_{21} \tag{2}$$

이다. 여기서 ν_p는 펌프 광원의 주파수이고, σ_A는 펌프 주파수에서의 흡수 단면적이다. 실험에 이용된 광섬유는 YORK사의 모델 DF1500A YD770-01로서 어븀 이온이 약 220 ppm 도핑된 germano-alumino silicate 광섬유이며 NA가 0.22, 배경 손실이 3.3 dB/km, 차단 파장이 910 nm이고, 980 nm 파장에서 5.0 dB/m의 손실을 갖는다. 먼저 이득 스펙트럼을 측정하기 위해 밀도 반전율이 100 % 가능하도록 수 cm의 짧은 어븀 첨가 광섬유에 파장 980 nm의 펌프 광원을 충분히 크게 입사시켰고, 흡수 스펙트럼을 측정하기 위해 약 1 m의 광섬유에 약한 백색 광원을 입사시켜[5] 그림 2와 같은 단위 길이당 이득 및 흡수 스펙트럼 특성을 얻었다.

광섬유 레이저를 구성하기 위해 길이 15.8 m의 어븀 광섬유를 파장 분할 다중화 (wavelength division multiplexer) 광섬유 결합기 (fiber coupler)의 한 쪽에 융착 접속 (fusion splicing)하고 진행 방향의 수직축에 대해 8° 경사로 연마된 굴절지수 조화셀(index matching cell)을 공진기 양단에 그림 3과 같이 부착하여 원하지 않는 레이저의 발진을 억제하였다.

배율이 20배인 렌즈와 유전체 코팅된 거울을 이용하여 Fabry-Perot형 레이저 공진기를 구성하였다. 사용된 펌프 광원은 양자 효율이 높고 펌프 여기 상태 흡수가 없는 것으로 알려져 있는 파장 980 nm의 광섬유가 접속된 (fiber pigtailed) Seastar사의 모델 PM-450A-980 레이저

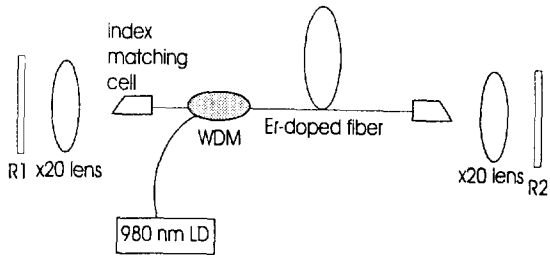

그림 3. 광섬유 레이저의 구성도.

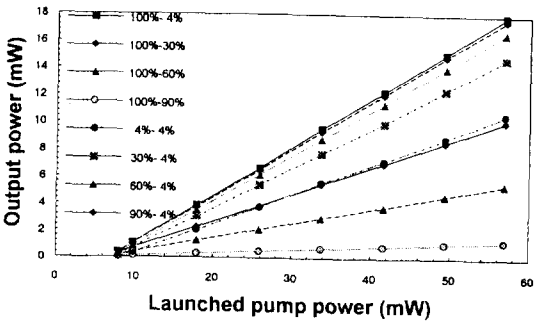

그림 4. 공진기 반사율에 따른 펌프 파워에 대한 레이저 출력.

다이오드로서 광섬유 끝단에서 최대 파워 65 mW를 갖는다. 이용된 공진기의 반사율은 굴절지수 조화셀을 부착하지 않은 광섬유 단면과 공기간의 Fresnel 반사에 의한 약 4% 한 가지와 유전체 코팅되어 1.5～1.6 μm 사이에서 반사율이 각각 30%, 60%, 90%와 100%인 유전체 코팅된 거울을 그림 3의 $R1$과 $R2$에 사용하였으며 부분 거울 $R2$를 레이저의 출력 결합기로 이용하였다. 먼저 그림 3에서 굴절지수 조화셀을 부착하지 않았을 때의 광섬유 단면과 공기간의 반사율 4%를 입출력 거울로 이용하였다. 다음으로 $R2$는 광섬유 단면에서의 4% 반사를 이용하고, $R1$으로는 광섬유 단면에 굴절지수 조화셀을 부착하여 단면에서 공진기로 반사되는 것을 막은 후 반사율이 30%, 60%, 90%, 100%인 부분 거울을 차례로 이용하였다. 이와 같이 구성된 선형 공진기에 WDM 결합기를 통해 파장 980 nm의 펌프 광원을 입사시키고, 펌프 광 세기의 변화에 대한 레이저 출력을 조사하였다. 다음으로 공진기의 $R1$을 100%로 두고 출력 결합기 쪽에 굴절지수 조화셀을 부착한 후 $R2$를 30%, 60%, 90%로 바꾸면서 실험한 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4로부터 공진기 반사율 $R1\cdot R2$값에 대한 경사 효율과 문턱 펌프 파워를 그림 5에 나타내었다. 경사 효율은 $R1\cdot R2$값이 0.04(이때 $R1=100\%$, $R2=4\%$)일

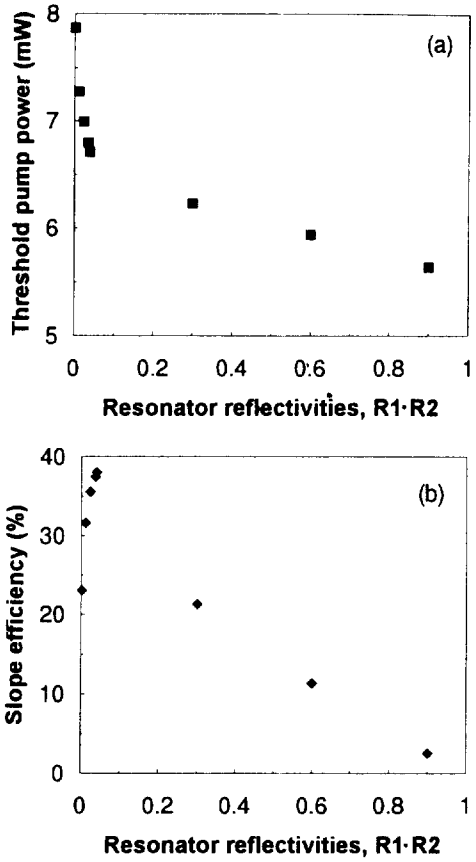

그림 5. 공진기 반사율에 대한 (a) 문턱 펌프 파워와 (b) 경사 효율.

때 최대 38%를 얻었고, 레이저 문턱 펌프 파워는 수 mW 단위로 나타났으며 반사율 $R1 \cdot R2$값의 증가에 따라 문턱 펌프 파워가 낮아지는 이유는 레이저 발진을 위한 문턱 이득값이 $\ln(1/R1 \cdot R2)$에 비례하기 때문이다.

공진기 반사율에 따른 레이저의 발진 파장의 변화를 살펴보기 위해 공진기내에서 어븀 이온의 평균 밀도 반전율 (average population inversion: $N_2/(N_1+N_2)$)의 개념을 도입하였다. 광섬유 길이로 정규화한 파장에 따른 순이득 (G_{dB}/m)은 앞에서 구한 이득 스펙트럼 (g_{dB}/m), 흡수 스펙트럼 (σ_{dB}/m)과 어븀 이온의 평균 밀도 반전율 (Inv_{ave})간에

$$G_{dB/m}(\lambda,\ Inv_{ave}) = g_{dB/m}(\lambda) \cdot Inv_{ave} - \alpha_{dB/m}(\lambda) \cdot (1 - Inv_{ave}) \quad [dB/m] \tag{3}$$

의 관계를 갖는다. 즉 어븀 이온의 평균 밀도 반전율이 높아짐에 따라 파장별 이득값은 증가하고 밀도 반전되지

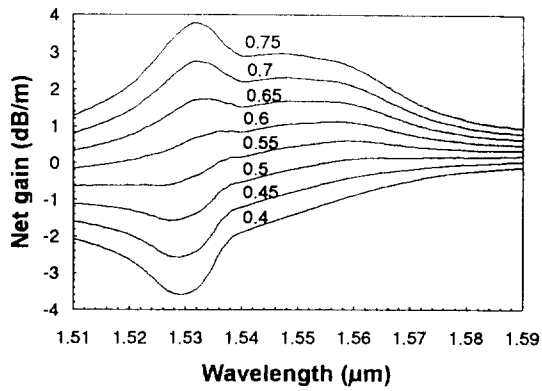

그림 6. 평균 밀도 반전율 (0.40~0.75)에 따른 파장에 대한 순이득.

않은 어븀 이온은 흡수에 관여하므로 어븀 광섬유의 전체 이득값은 둘 간의 차이에 어븀 광섬유의 길이를 곱한 값이 된다. 이를 위한 가정으로서 Er:Si 광섬유가 상온에서 균질한 매질(homogeneous medium)이고 배경 손실(background loss)이 무시할 정도로 작다고 하였다. 그림 2의 이득 및 흡수 스펙트럼을 이용하여 식 (3)으로부터 얻은 평균 밀도 반전율 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 %에서의 파장에 대한 순이득은 그림 6과 같고, 각 평균 밀도 반전율에서의 최대 순이득과 그 때의 파장(첨두 파장)을 그림 7에 나타내었다.

어븀 광섬유의 종류에 따라 파장 의존성을 갖는 흡수 및 이득 스펙트럼은 다르게 얻어지고, 스펙트럼의 특성으로부터 어븀 이온의 평균 밀도 반전율이 증가하면 식 (3)의 첫째항이 점점 지배적으로 작용하여 첨두 파장은 낮아지고, 감소하면 흡수가 지배적이므로 어븀의 이득 스펙트럼의 장파장에서 첨두 파장이 결정된다. 실험에 사용된 광섬유의 경우는 최대 이득이 레이저의 발진이 가능한 0 dB 이상을 갖는 평균 밀도 반전율의 값이 38 %이었고, 평균 밀도 반전율이 68% 부근에서 첨두 파장이 1.55 μm로부터 1.53 μm로 천이하였다. 공진기에 이용되는 어븀 광섬유의 길이가 길어지면 문턱 이득값이 작고 반사율 $R1 \cdot R2$값의 변화에 대해 변화폭이 좁아지므로 어븀 이온의 평균 밀도 반전율이 전반적으로 낮은 영역에 분포하게 된다. 광섬유 레이저를 선형 공진기로 구성하였기 때문에 발진 조건은 공진기의 왕복 이득(round trip gain)이 $R1 \cdot R2 \cdot (1-\gamma) \cdot \exp[2 \cdot G_{dB/m} \cdot L] = 1$일 때이고, 여기서 γ는 왕복시 발생되는 손실이다. 따라서 공진기의 총손실을 어븀 광섬유의 길이로 나눈 값을 최대 순이득으로 갖는 평균 밀도 반전율

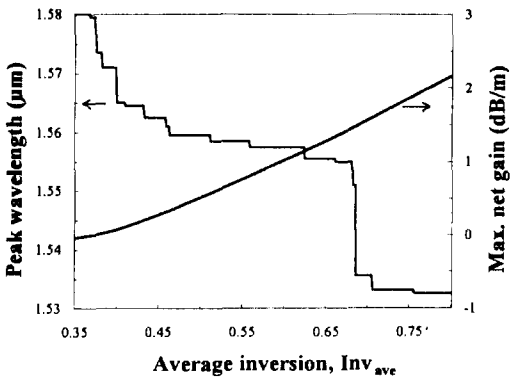

그림 7. 평균 밀도 반전율에 대한 최대 순이득과 그 때의 파장 (첨두 파장).

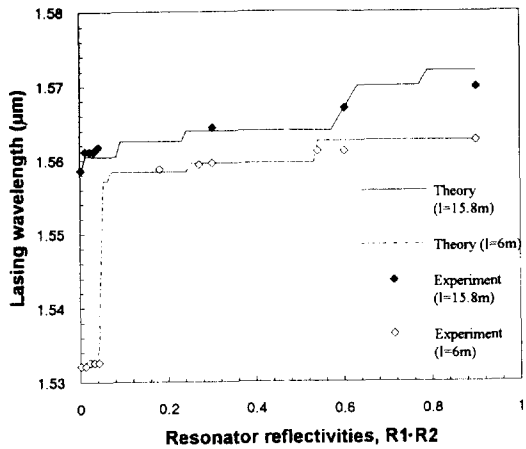

그림 8. 어븀 광섬유 길이 6 m와 15.8 m에서의 공진기 반사율에 대한 레이저 발진 파장.

$$[G_{dB/m}(\lambda,\ Inv_{ave})]_{max}=5\cdot\log(\ln(1/(R1\cdot R2\cdot(1-\gamma))))/L\ [dB/m] \quad (4)$$

에서 레이저가 발진되고, 그 때의 첨두 파장이 발진 파장으로 결정된다. 그 이상의 펌프 파워에 대해서는 출력 결합기를 통해 유도 방출되어 평균 밀도 반전율은 일정하게 유지되므로 펌프 파워의 크기에 관계 없이 레이저의 발진 파장이 유지된다. 그림 8은 어븀 광섬유 길이 15.8 m와 6 m에서의 공진기 반사율 $R1\cdot R2$값에 대한 발진 파장의 변화를 보여준다. 실험에 사용된 어븀 첨가 광섬유의 단위 길이당 흡수 및 이득값을 고려할 때 레이저 공진기에 이용된 광섬유 길이 15.8 m는 긴 길이에 해당하므로 레이저의 문턱 이득을 얻기 위한 평균 밀도 반전율이 공진기 반사율 $R1\cdot R2$값의 변화에 대해 낮은 영역에 분포하여 1.53 μm에서의 레이저 발진 파장이 존재하지 않고 1.558 μm와 1.57 μm 사이에 분포하였다. 그러나 광섬유의 길이가 6 m로 짧은 경우에는 0.04 이하의 공진기의 반사율에 대해 1.532 μm에서 레이저가 발진되었으며 반사율이 높아짐에 따라 1.563 μm까지 발진되었다. 반사율의 변화에 대해 1.53 μm와 1.55 μm 사이에서 발진 파장이 형성되지 않는 이유는 그림 7에서와 같이 파장 의존성을 갖는 어븀 광섬유의 이득 및 흡수 분포에 의해 결정되는 평균 밀도 반전율에 따른 첨두 파장이 그 파장 영역에서는 형성되지 않기 때문이다. 이득 및 흡수 스펙트럼과 평균 밀도 반전율로부터 구한 레이저의 발진 파장과 실험으로부터 얻은 결과와의 오차는 렌즈 및 거울의 광학 손실, 광섬유로의 결합 손실, 그리고 특히 어븀 광섬유의 흡수 및 이득 스펙트럼의 정확한 측정의 어려움에서 기인한다. 여기서 광섬유 Bragg 반사기를 입출력 거울로 이용하면 광학 손실과 결합 손실을 해결할 수 있을 것이다. 따라서 광섬유 레이저의 발진 파장을 보다 잘 예측하기 위해서는 흡수 및 이득 스펙트럼의 정확한 측정이 중요하다.

III. 결 론

어븀 첨가된 광섬유로 레이저 공진기를 구성하여 공진기의 결합기 반사율과 펌프 파워에 대한 레이저의 출력 특성을 조사하였다. 실험 결과 펌프 문턱 파워는 mW 단위로 낮았고, 공진기의 양쪽 거울의 반사율이 100%와 4%일 때 최대 38%의 경사 효율을 가졌다. 공진기 반사율의 변화에 대한 레이저의 발진 파장은 어븀의 평균 밀도 반전율에 따른 첨두 파장의 변화로부터 구한 발진 파장과 잘 일치하였으며, 발진 파장은 공진기 반사율의 변화에 대해 어븀 광섬유의 길이가 15.8 m일 때 1.558 μm와 1.570 μm 범위에서 형성되었으며, 6 m일 때는 어븀 이온의 밀도 반전율의 증가로 발진 파장 영역이 어븀의 형광 대역의 낮은 영역인 1.532 μm와 1.563 μm 범위였다.

참 고 문 헌

[1] B. J. Ainslie, S. P. Craig, and S. T. Davey, IEEE J. Lightwave Technol. **6**, 287(1988).
[2] P. Urquhart, IEE Proceedings **135**, 385(1988).
[3] 박서연, 이학규, 김경헌, 제 2 회 광자기술 학술회의 논문집 **2**, 21(1993).
[4] R. J. Mears and S. R. Baker, Optical and Quantum Electron. **24**, 517(1992).
[5] C. R. Giles and E. Desurvire, J. Lightwave Technol. **9**, 271(1991).

Characteristics of Er-Doped Fiber Laser on Resonator Reflectivities and Pump Power

Seo Yeon Park, Hak Kyu Lee and Kyong Hon Kim
Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-600, Korea

Donghan Lee
Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

(Received: Junuary 20, 1994)

Lasing characteristics of an Er-doped fiber laser have been investigated at various conditions of resonator reflectivities and pump powers. Variation of the laser wavelength with various mirror reflectivities has been compared with the theoretical analysis based on absorption, gain spectra, and resonator parameters. The maximum slope efficiency of 38% was obtained with the resonator's mirror reflectivities of 100% and 4% on both sides, and the threshold powers were varied from 7.8 mW to 5.6 mW, and lasing wavelengths were varied 1.532 μm to 1.563 μm and 1.558 μm to 1.570 μm for 6 and 15.8 m-long Er-doped fiber, respectively, as the resonator reflectivities were changed from 0.0016 to 0.9.