

S/S+ band에서 넓은 파장가변 영역을 가지고 50-GHz ITU-T 격자에 맞는 채널을 생성하는 thulium이 첨가된 광섬유 레이저

안성준 · 박철근

선문대학교 전자정보통신공학부
Ⓣ 336-708 충남 아산시 탕정면

안승준

선문대학교 자연과학부 신소재과학전공
Ⓣ 336-708 충남 아산시 탕정면

박종한 · 박남규[†]

서울대학교 전기컴퓨터공학부
Ⓣ 151-742 서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1번지

(2003년 7월 18일 받음, 2004년 1월 2일 수정본 받음)

S/S+ band에서 ITU-T의 50 GHz 격자에 맞는 채널을 가지는 광대역 파장가변 thulium 첨가 광섬유레이저(TTDFL)를 개발하였다. 1.4 μm 및 1.5 μm 두 대역의 광원으로 펌핑되는 thulium 첨가 광섬유(TDF)의 반전에 관한 분석을 통해, 대부분의 S/S+ band에서 파장을 가변할 수 있는 레이저를 구현하였다. 이 파장가변 레이저는 65.1 nm의 넓은 3-dB 대역폭 내에서 6.7 dBm 이상의 평탄한 출력 스펙트럼을 보여주었고, 생성된 DWDM 채널 수는 178개에 달하였다. 또한 보조 펌프의 출력을 더 높일 경우 66.2 nm까지도 대역폭을 넓힐 수 있었고, 공진기 내부 필터의 온도를 조절함으로써 레이저의 주파수를 더욱 안정화 할 수 있음도 보였다. 본 연구에서 개발된 이 레이저는 S/S+ band에서 기존 파장을 제공하는 유용한 광원으로 활용될 수 있다.
주제어 : fiber lasers, optical fiber communication, thulium-doped fiber amplifiers(TDFAs), dense wavelength-division multiplexing (DWDM), 50-GHz ITU-T grid.

I. 서 론

근래 인터넷 및 각종 통신의 발달로 인해 통신용량을 급격히 늘려야 할 필요가 생겼고, 이를 해결하기 위한 연구개발의 결과로 1990년대 중반에 고밀도 파장분할방식(DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 광전송 기술이 등장하였다

DWDM 기술은 광전송 용량을 획기적으로 증가시킴으로써, 현재 정보통신 사회에서 기간망을 유지하는 핵심적인 역할을 하고 있다. 그러나 최근 온라인 게임이나 영화 등 통신의 콘텐츠에서 멀티미디어 서비스가 차지하는 비중이 급속히 커지면서, 전송용량 증대에 대한 요구는 여전히 지속되고 있다.

최근 DWDM 기술에서 광섬유 하나의 전송용량을 증대시키는 방법으로서 검토되고 있는 것으로는 기본적으로 다음과 같은 세 가지 방법이 있다. 그 첫 번째는 채널의 전기적인 변조 속도를 40 Gbps로 올리는 것이고, 두 번째로는 DWDM 각 채널들 사이의 간격을 25 GHz 정도로 더욱 좁게 하는 것이다. 그러나 이러한 방법들은 편광모드분산(PMD: Polarization Mode Dispersion)이나 광섬유의 비선형현상 등의 문제로 인해 실제 시스템에 적용하려면 기술적 또는 경제적인 어려움이 큰

편이다. 그러므로 남은 한 가지 방법인 새로운 전송 대역을 개발하는 것에 많은 노력이 진행되고 있는데, 지난 몇 년간 개발되어 거의 상용화 단계에 있는 L-band도 이러한 새로운 전송 대역의 예라고 하겠다.^[1,2]

L-band의 등장으로 DWDM의 전송용량이 거의 두 배 가까이 증가시킬 수 있음에도 불구하고, L-band와 병행하여 통신용량을 확장하거나 또는 L-band 대신 사용하기 위하여 1450 nm에서 1530 nm 파장 영역에 해당하는 S 및 S+ 대역이 새로운 전송 대역으로서 큰 관심을 모으고 있다. 특히, 최근 thulium 첨가 광섬유증폭기, 라만증폭기, DFB 레이저 및 고출력 펌프 레이저 기술들이 발전함에 따라 S/S+ band를 실제로 전송 시스템에 적용할 수 있는 가능성이 크게 높아지고 있다.^[3,4]

기존의 C-band와 L-band에서 채널들 사이의 간격은 ITU-T의 규격에 의해 50 GHz로 정해져 있는데, S/S+ band에서 이와는 다른 새로운 규격을 도입할 이유는 별로 없다고 보인다. 따라서 이 파장 대역에서 이러한 채널 간격을 가지면서 기존 파장을 제공하는 광원은 앞으로 시스템 제조업체나 연구소 등에게 매우 유용한 도구가 될 것이다. 그러나 S/S+ band에서는 thulium 첨가 광섬유증폭기 및 라만증폭기 등 광증폭기의 개발은 매우 활발히 이루어진 반면, 이러한 광원 개발에 관한 노력은 상대적으로 미약한 상태라고 하겠다.^[3-8] 앞선 연구결

[†]E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr

과에 의하여, 에르븀첨가 광섬유레이저(Erbium-doped Fiber Laser)에서 레이저의 대역폭을 크게 만들면서 동시에 레이저의 파장을 ITU-T 격자(grid)에 맞추는 것은 어렵다는 것이 알려져 있다.^[9] 더욱이 erbium 대신에 thulium을 사용하는 경우는 이것이 더욱 어려워지는데, 그것은 thulium의 에너지 준위들 사이에서 일어나는 천이 과정이 매우 복잡하기 때문이다.

이 논문에서는 이러한 어려움을 극복하고, S/S+ band에서 50 GHz ITU-T 격자에 맞으면서 매우 넓은 범위에서 파장이 가변되는 레이저의 개발에 관한 내용을 소개하고자 한다. 개발된 레이저는 thulium 첨가 광섬유(TDF: Thulim-Doped Fiber)를 이득매질로 사용하여 구성된 고리형 레이저이다. 1.5 μm 영역의 보조 펌프 및 1.4 μm 영역의 주 펌프에 대한 레이저의 동작에 관한 고찰을 통하여, TDF 내의 반전상태(inversion state)에 대한 최적화를 수행함으로써 레이저의 성능을 최적화할 수 있었다. 이렇게 개발된 파장가변 thulium 첨가 광섬유레이저(TTDFL: Tunable Thulium-Doped Fiber Laser)의 파장가변 영역은 최대 66 nm 이상으로 S/S+ band의 대부분을 차지하였고, 출력 또한 모든 채널에서 6.7 dBm 이상으로 광원으로 사용하기에 충분했다. 또한, 공진기 내부에 있는 필터의 온도를 적절히 조절함으로써 레이저의 주파수 안정성을 높일 수 있음도 보였다.

II. 실험장치

그림 1은 이 실험에서 사용된 TTDFL의 구성도이다. 이득매질로는 길이 20 m의 TDF(thulium-doped fiber)가 사용되었다. TDF에서 thulium의 농도는 2000ppm, core와 cladding의 굴절률 차이는 2.5%였다. 주 펌프광원으로는 1.42 μm 및 1.43 μm의 레이저 다이오드의 광을 결합하여 사용하였고, 이와 함께 1.56 μm의 외부 공진기형 레이저에서 나오는 광을 EDFA를 통해 증폭시켜 보조 펌프광원으로 사용하였다. 이렇게 함으로써 레이저의 효율을 높이고, 이득을 고정시키며 또한 이득의 파장에 따른 기울기(tilt)의 조절을 달성할 수 있다.^[10-12] 이 때, EDFA에서 나오는 보조 펌프가 지나치게 높은 출력으로 TDF에 들어가는 것을 방지하기 위해 VOA(Variable Optical Attenuator)를 사용하여 보조 펌프광의 세기를 조절하였다.

한편, 공진기 내부에 광 분리기를 사용하여 한 방향으로 레이저광이 진행되도록 하면서, 동시에 TDF로부터 나오는 ASE (Amplified Spontaneous Emission)가 펌프 레이저 다이오드들로 유입되는 것을 막았다. 또한, ITU-T의 간격의 격자에 레이저의 출력을 정확히 맞추기 위해 FSR(Free Spectral Range) 50 GHz를 가지는 FFPF(Fiber-pigtailed Fabry-Perot Filter)를 삽입하였는데, 이 필터는 온도를 조절함으로써 통과 대역을 미세하게 이동시킬 수 있다. 또 다른 필터인 FFPTF(Fiber-pigtailed Fabry-Perot Tunable Filter)는 FFPF에 의해 형성된 50 GHz 간격의 채널들 중에서 원하는 채널을 선택하기 위한 것으로서 FSR은 약 9 THz, FWHM(Full Width Half Maximum)은 100 GHz인 특성을 가지고 있다. 이득매질을 제외하고 측정된 공진기의 광 손실은 1.47 μm에서 6.75 dB이었다. 고리형 공진기에서 출력 레이저광 및 펌프광은 3-dB coupler를 통해

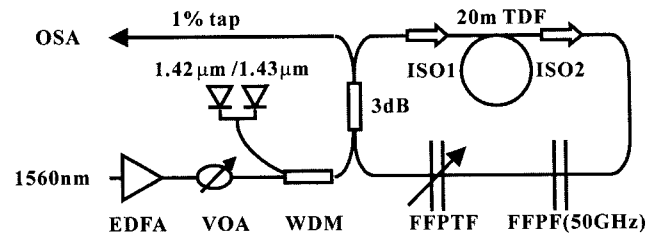


그림 1. 파장가변 thulium 첨가 광섬유레이저(TTDFL)의 실험 구성도.

추출되었고, 다시 1%의 tapping을 통해 OSA(Optical Spectrum Analyzer)에서 관찰되었다.

OSA는 정확한 측정을 하기 위해, ¹³C₂H₂ 아세틸렌 흡수체 및 높은 정밀도를 지닌 파워미터를 사용하여 파장과 광 출력 측정값을 보정한 후 사용하였다. 보정을 한 후 OSA의 파장 및 파워 정확도는 각각 제조회사가 제공하는 규격에 의하여 각각 ±0.02 nm 및 ±0.3 dB 이내라고 볼 수 있다.

III. 실험 결과

그림 2는 TTDFL의 기본적인 동작을 살펴본 것으로 주 펌프 및 보조 펌프, 그리고 1.47 μm에서 발진하는 TTDFL의 출력 스펙트럼을 보여주고 있다. TDF에 입사되는 주 펌프광의 세기는 1.42 μm가 69.6 mW, 1.43 μm가 81 mW였고, 1.56 μm의 보조 펌프광의 세기는 1.46 mW였다.

Thulium-Doped Fiber Amplifier(TDFA)의 성능을 최적화하기 위해서는 주 펌프와 보조 펌프의 상호작용을 주의 깊게 관찰해야 하는데,^[8] 이는 이득매질로서 TDF를 사용하는 레이저의 경우도 마찬가지이다. 그러므로 TTDFL의 성능을 최적화하기 위해 우선 그림 3과 같이 주 펌프 및 보조 펌프의 조건을 변화시키면서 레이저의 특성을 조사하였다. 이해를 돕기 위해 그림 3에 TDF의 energy diagram, 주 펌프(λ_{pm}), 보조 펌프(λ_{ps}) 및 여기서 생기는 레이저(signal)의 관계를 나타내었다. 그림 4에서 □(open square)는 보조 펌프광의 세기를 변화시

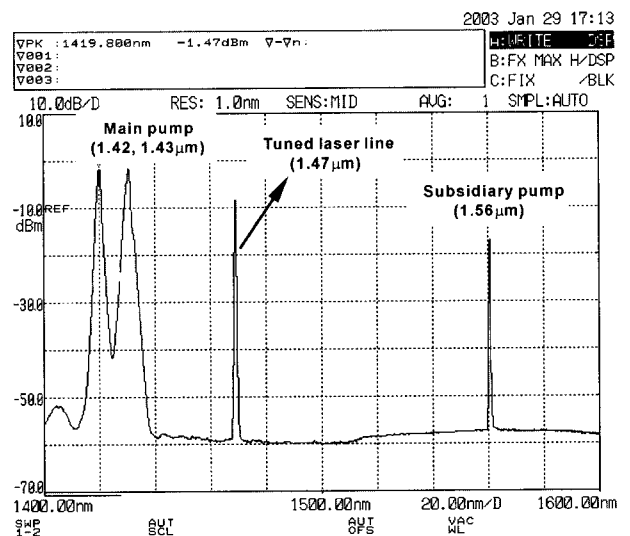


그림 2. 1.47 μm에서 발진하는 TTDFL의 OSA 화면.

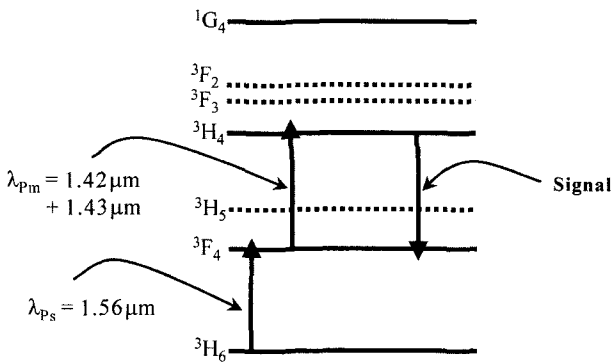


그림 3. TDF의 Energy Diagram과 주 펌프, 보조 펌프, 그리고 레이저 signal과의 관계.

키면서 레이저가 1.48 μm 파장에서 발진(lasing)하기 위해 요구되는 주 펌프광의 최소 세기를 측정하였다. 보조 펌프광의 세기가 1 mW보다 작을 경우에는 주 펌프광이 150 mW 정도로 매우 강해야 레이저가 발진을 시작하는 반면, 보조 펌프광이 15 mW일 경우에는 36 mW의 주 펌프광만 있으면 레이저가 동작함을 알 수 있다.

주목할 만한 것은, 보조 펌프광의 출력이 약 15 mW 이상일 경우 레이저의 발진을 위해 요구되는 주 펌프광의 세기가 다시 증가하는 현상인데, 이는 다음과 같이 설명될 수 있다: 보조 펌프광이 15 mW 이하일 때(그림에서 (1)로 표시된 영역)는 증폭 과정에 참여하는 이온들의 수가 별로 없다. 따라서 공진기의 광 손실을 극복하고 레이저가 동작하기 위해서는 높은 반전률(inversion level)이 요구된다. 증폭 과정에 참여하는 이온의 밀도가 낮을 경우에는 펌프 고갈(pump depletion)이 없기 때문에, 이득물질의 반전률은 주로 주 펌프광의 세기에 의해 결정된다. 따라서 높은 반전률을 얻기 위해서는 주 펌프광의 세기가 커야 된다. 또한 이 영역에서는 보조 펌프 세기의 증가로 인해 증폭 과정에 참여하는 이온들의 수가 증가하면, 펌프 고갈(pump depletion)이 일어나지 않는 한 주 펌프의 세기가 줄어들어도 레이저가 발진할 수 있다. 즉, 레이저의 threshold가 낮아지는 것이다. 반면, 보조 펌프가 15 mW보다 큰 경우(그림에서 (2)로 표시된 영역)에는 thulium의 에너지 준위 3F_4 와 3F_4 사이에서 주 펌프광의 흡수가 심해지고, 이로 인해 상당한 펌프 고갈이 일어난다. 이렇게 되면 반전률이 낮아지고 이득의 최고점(peak)이 좀 더 장파장(long wavelength) 쪽으로 이동하게 된다. 따라서 이 영역에서는 보조 펌프의 세기를 증가시키게 되면, 같은 이득 수준을 유지하기 위해 요구되는 주 펌프의 세기는 더 커져야 하는 것이다. 즉 그림에서 보듯이 레이저의 threshold가 올라가게 되는 것이다.

그림 4에서 ●(solid circle)은 주 펌프의 세기를 153 mW로 고정시키고, 보조 펌프의 세기에 따른 TDFL 레이저의 파장가변 범위를 본 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 보조 펌프의 세기가 0.52 mW일 때의 파장가변 범위는 35.14 nm에 불과한 반면, 이를 12.1 mW로 증가시키면 가변 범위가 65.1 nm로 크게 확대되는 것을 알 수 있다. 보조 펌프의 세기가 15 mW보다 커지면서 조금씩 파장가변 범위가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 언급한 과정에 의해 TDF의 이득이 장파

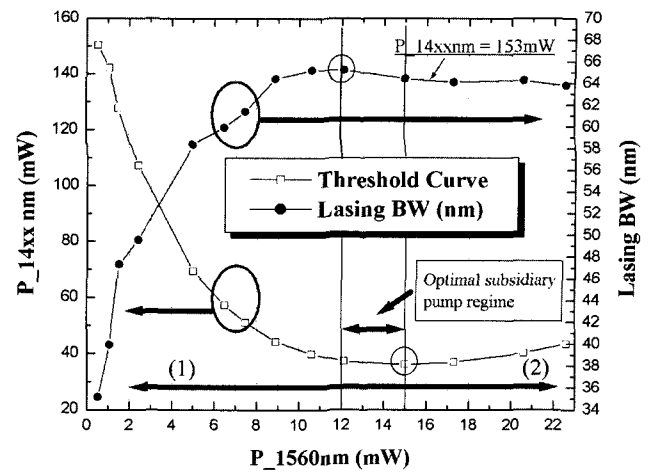


그림 4. 1.56 μm 보조 펌프의 세기에 따른 레이저의 특성변화(□: 1.48 μm에서 레이저가 발진하기 위한 주 펌프광의 threshold 세기, ●: 주 펌프광의 세기가 153 mW일 때 레이저의 파장가변 범위).

장으로 옮겨가면서 이득곡선의 평탄도가 줄어들기 때문이다.^[8] 이상의 실험결과로 볼 때, 주 펌프의 세기가 약 153 mW인 조건에서는 TDFL 보조 펌프의 최적화된 출력은 12 mW에서 15 mW 사이라고 할 수 있다. 그림 5는 이러한 최적화된 조건에서 TDFL 레이저의 출력 스펙트럼을 OSA의 maximum holding 기능을 사용하여 얻은 것을 보여주고 있다. 펌프광의 세기는 1.42 μm, 1.43 μm 및 1.56 μm에서 각각 75.1 mW, 78.1 mW, 그리고 12.1 mW였다. 그림에서 볼 수 있듯이 3-dB 대역폭이 65.1 nm의 넓은 영역(1452.21 nm-1517.3 nm)에 걸쳐 6.7 dBm 이상의 매우 평탄한 출력 스펙트럼을 얻을 수 있었고, 스펙트럼 내에 존재하는 DWDM의 채널 수는 178개에 달하였다. 이 때 보조 펌프의 출력을 22 mW로 더 증가시켜 주면, 장파장 쪽의 이득이 증가되므로 그림 5에 나타난 것처럼 1518.4 nm까지도 추가로 파장가변 영역을 확장할 수 있다. 따

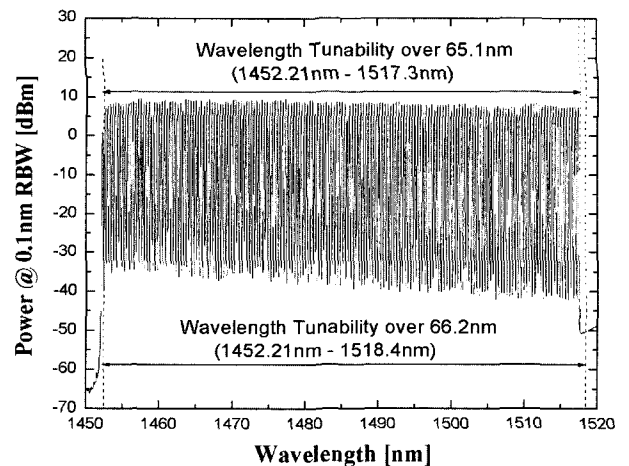


그림 5. TDFL의 파장가변 영역 및 DWDM 채널 스펙트럼: 보조 펌프의 출력이 12.1 mW일 때 파장가변 영역 65.1 nm 및 50 GHz 간격의 DWDM 채널 178개를 얻을 수 있었고, 보조 펌프의 출력을 22 mW로 증가시키면 장파장 쪽의 이득이 증가하여 최대 66.2 nm의 파장가변이 가능함.

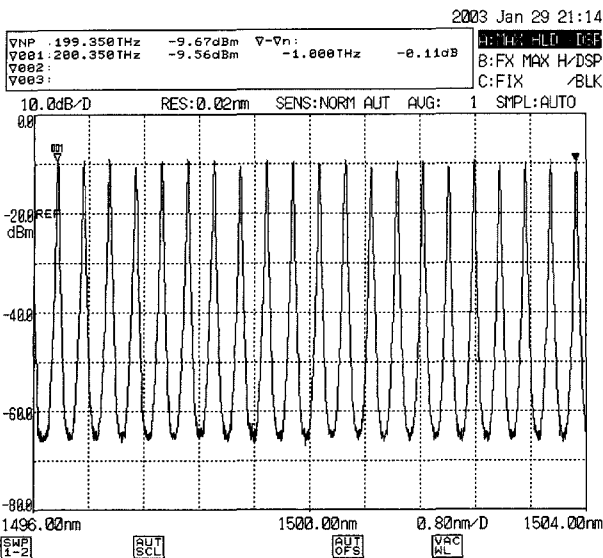


그림 6. TTDFL 채널의 스펙트럼 화면: 가장 왼쪽 채널(∇ 001 표시된 곳) 및 가장 오른쪽 채널(\blacktriangledown 표시된 곳) 사이의 20개 채널 간격이 1.000 THz이다.

라서 보조 펌프의 출력을 적절히 조절해 가면서 본 레이저를 사용하여 최대 66.2 nm(1452.21 nm-1518.4 nm)의 넓은 파장가변 범위를 얻을 수 있었다.

여기서 한 가지 언급하고 넘어갈 실험적 사실은, 일반적인 광증폭기와는 달리 출력 스펙트럼의 평탄도가 보조 펌프의 출력과 관계가 없었다는 것이다. 이는 고리형 공진기 내부에서 TDF가 포화된 상태에서 동작하였기 때문으로 해석된다.

이 파장가변 thulium-doped fiber 레이저의 채널 특성을 좀 더 세밀히 보기위해 1496 nm에서 1504 nm까지 8 nm 파장 범위를 관찰한 것이 그림 6에 나타나 있다. 이 때 OSA의 분해능은 0.02 nm였고, 총 sampling 수는 2001개로 0.04 pm마다 샘플링 하였다. 그림에서 20개 채널 간격으로 이루어진 가장 왼쪽 채널(∇ 001 표시된 곳)과 가장 오른쪽 채널(\blacktriangledown 표시된 곳) 사이의 주파수 차이가 1.000 THz로서 채널들이 ITU-T 격자

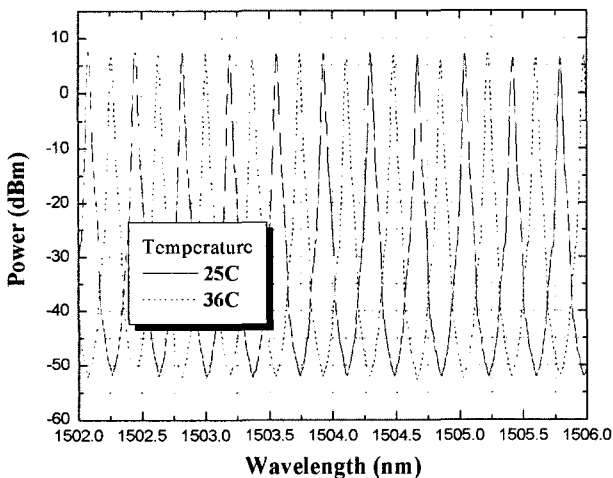


그림 7. FFPF의 온도변화에 따른 TTDFL의 출력 스펙트럼 변화(실선은 FFPF가 25°C일 때, 점선은 FFPF가 36°C일 때. OSA의 분해능은 0.02 nm였음).

간격과 일치함을 확인할 수 있다. 여기서 OSA의 분해능을 고려하여 발생할 수 있는 최대 오차는 1.000 THz에 대해 0.04 nm, 주파수로 환산하면 5 GHz이다. 따라서 한 채널 간격 50 GHz에서는 오차는 0.25 GHz 보다 작다.

이 레이저의 주파수 안정성을 더욱 향상시키기 위해 앞에서 언급했던 FFPF의 온도에 따른 특성변화를 이용하여 실험한 결과가 그림 7에 나타나 있다. 그림 7에서 FFPF의 온도는 25°C에서 36°C로 11°C 만큼 변화시켰고, 레이저의 출력 스펙트럼을 보면 전체적으로 채널들의 위치가 약 0.2 nm만큼 이동된 것을 알 수 있다. 상용화된 온도 조절기의 오차가 0.01°C 정도임을 감안하면, 이 레이저 채널을 ± 0.2 pm 오차 이내로 안정되게 조절할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

S/S+ band에서 50 GHz ITU-T 격자에 부합하는 채널을 발생시키는 파장가변 thulium이 첨가된 광섬유레이저(TTDFL)를 개발하였다. TTDFL의 동작에서 1.56 μ m 파장의 보조 펌프광의 세기는 주 펌프광의 threshold 및 레이저의 파장가변 범위를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것을 발견하였고, 이를 최적화하여 S/S+ band 대부분의 영역에서 파장을 가변할 수 있는 레이저를 개발하였다. 개발된 레이저는 최대 66.2 nm의 파장 범위에서 3-dB 출력이 6.7 dBm 이상이고 매우 평탄한 스펙트럼 모양을 보여주었다. 또한, 공진기 내부에 있는 FFPF 필터의 온도 조절을 통하여 이 레이저의 채널의 안정성을 더욱 향상시킬 수 있음도 보였다.

한 가지 더 언급할 것은, S/S+ band에서 ITU-T의 채널 규격이 굳이 50 GHz가 아니라 다른 것으로 정해지더라도 본 연구에서 얻은 결과들은 크게 영향을 받지 않는다는 점이다. 즉, 본 연구에서 개발된 레이저 공진기 내부의 FFPF를 새로운 채널 간격과 같은 FSR 값을 가지는 것으로 교체만 해주면 되므로, 이 레이저는 새로운 규격이 나오더라도 S/S+ band에서 기존 파장을 제공하는 광원으로 사용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] J. M. Oh, H. B. Choi, D. Lee, S. J. Ahn, S. J. Jung, and S. B. Lee, "Demonstration of highly efficient flat-gain L-band EDFAs by incorporating a fiber Bragg grating," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 9, pp. 1258-1260, 2001.
- [2] H. H. Lee, J. M. Oh, B. J. Kim, and D. Lee, "Investigation of amplifying mechanism in an L-band EDFA pumped by a 980 nm pump," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 7, no. 2, pp. 67-71, 2003.
- [3] T. Sakamoto, "S-band fiber-optic amplifiers," in *Optical*

- Fiber Communication Conference '2001, Optical Society of America, Anaheim, USA, 2001, TuQ1.
- [4] M. N. Islam, "Raman amplifiers for telecommunications," *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, No. 3, pp. 548-559, 2002.
- [5] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "Laser-diode-pumped highly-efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510-nm band," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 433-435, 2001.
- [6] F. Roy, F. Leplingard, L. Lorcy, A. Le Sauze, P. Baniel, and D. Bayart, "48% power conversion efficiency in single pump gain-shifted thulium-doped fiber amplifier," *Electronic Letters*, vol. 37, pp. 943-945, 2001.
- [7] S. Aozasa, H. Masuda, H. Ono, T. Sakamoto, T. Kanamori, Y. Ohishi, and M. Shimizu, "1480-1510 nm band Tm-doped fibre amplifier with high power conversion efficiency of 42%," *Electronic Letters*, vol. 37, pp. 1157-1158, 2001.
- [8] S. Aozasa, H. Masuda, T. Sakamoto, K. Shikano, and M. Shimizu, "Gain-shifted TDFA employing high concentration doping technique with high internal power conversion efficiency of 70%," *Electronic Letters*, vol. 38, pp. 361-363, 2002.
- [9] H. Ryu, D. Lee, W. Lee, H. Moon, H. Suh, "A Discretely Tunable Erbium-Doped Fiber Ring Laser with 273 Ch. 50 GHz-Spacing ITU-T Grids in C- & L-band Regions," in Optical Fiber Communication Conference '2003, Optical Society of America, Atlanta, USA, 2001, MF22.
- [10] W. J. Lee, C. H. Lee, J. Byun, J. Park, and N. Park, "Gain excursion & tilt compensation algorithm for TDFA using 1.4 mm/1.5 mm Dual Wavelength pump control," in Optical Fiber Communication Conference '2002, Optical Society of America, Anaheim, USA, 2002, ThZ3
- [11] J. Byun, P. Kim, W. J. Lee, C. H. Lee, and N. Park., "Analysis on the Transient Response of 1.4m/1.5m Dual Wavelength Pumped Thulium Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 11, pp. 1503-1505, 2002.
- [12] T. Tamaoka, "Comparison of Gain Characteristics of Tm-Doped Fiber Amplifier by Different Pumping Schemes," in Optical Fiber Communication Conference '2003, Optical Society of America, Atlanta, USA, 2003, FB4.

Widely tunable thulium-doped fiber laser anchored on 50-GHz ITU-T grid in S/S+ band

Seong Joon Ahn and Chul Keun Park

Electronics, I&C Engineering Dept., Sunmoon University, Tangjeong-myeon, Asan, Chungnam 336-708, KOREA

Seung Joon Ahn

Dept. of Physics, Sunmoon University, Tangjeong-myeon, Asan, Chungnam 336-708, KOREA

Jonghan Park and Namkyoo Park[†]

School of Electrical Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shilim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, KOREA

[†]*E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr*

(Received July 18, 2003, Revised manuscript January 2, 2004)

We demonstrate an S/S+ band discretely tunable thulium doped fiber laser (TIDFL), anchored on a 50-GHz ITU-T grid. Investigating the inversion analysis of the thulium doped fiber (TDF) in applying a dual wavelength (1.4 m and 1.5 m) pumping scheme, a laser whose tuning range covers most of the S/S+ band has been obtained. Within the wide 3-dB bandwidth of 65.1 nm, the output power of the tunable laser exceeds 6.7 dBm with very flat spectral profile and the number of DWDM channels generated is as large as 178. If we increase the subsidiary pump power to 22 mW, the bandwidth is expanded up to 66.2 nm. By controlling the temperature of the fine grid filter, we have also shown that the frequency locking capability of the laser can be improved. The laser developed in this work is expected to be utilized as a practical optical source providing reference wavelengths in the S/S+ band.

OCIS codes : 060.2330, 060.2320.