

어븀 첨가 광섬유의 증폭 자발 방출을 이용한 저온 측정

論 文

56-11-19

Cryogenic Temperature Measurement Using Amplified Spontaneous Emission of Erbium-Doped Fiber

李 鎔 旭[†]
(Lee Yong Wook)

Abstract - In this paper we propose a cryogenic sensor system which can measure the temperature at higher resolution at low temperature using temperature-dependent amplified spontaneous emission of erbium-doped fiber pumped by a 1480 nm laser diode. The measurement resolution of the sensor system could be enhanced through the modulation of injection current of the pump laser diode. The measurement resolution considering the fluctuation of the light source in the sensor system was ~ 0.4 K in the room temperature regime and ~ 0.07 K in the liquid nitrogen temperature regime.

Key Words : Optical Fiber Sensor, Temperature Sensor, Cryogenic Temperature, Erbium-Doped Fiber

1. 서 론

액체 질소 (liquid nitrogen) 온도 (약 77 K) 영역의 저온을 측정할 수 있는 광섬유 저온 센서는 광섬유의 무유도성과 전자기파에 대한 무간섭성, 그리고 유연성에 의한 설치의 편의성 등 여러 장점을 가지고 있어, 고온 초전도체 (high-temperature superconductor) 관련 전기기기들의 운전 시에 유용하게 사용될 수 있다. Dianov 그룹은 어븀 첨가 광섬유 (erbium-doped fiber; 이하 EDF)를 액체 헬륨 (liquid helium) 온도 영역에서 저온 센서 소자로 사용할 수 있다는 것을 처음으로 제안하였다. Dianov 그룹에서는 온도 변화에 따라 EDF에서 발생하는 광학적 손실의 변화량을 측정하여 5~10 K 온도 영역에서 0.5 K의 해상도를 얻었지만, 저온으로 갈수록 해상도가 낮아지는 단점을 지니고 있었다 [1]. 본 논문에서는 1480 nm 레이저 다이오드 (laser diode)로 여기된 EDF의 온도에 따른 증폭 자발 방출 (amplified spontaneous emission; 이하 ASE) 특성과 레이저 다이오드 주입전류의 변조를 이용하여, 저온으로 갈수록 높은 해상도로 온도를 측정할 수 있는 세기 기반 (intensity-based) 저온 센서 시스템을 제안하였다. 고 해상도의 온도 측정을 위해서, 즉 진폭 변조된 빛의 세기에서 전환된 전기적 신호의 진폭을 고 분해능으로 측정하기 위해서 잠금 증폭기 (lock-in amplifier)를 사용하여 광 검출기 (photodetector; 이하 PD)의 변조된 출력 신호에서 기본과 성분 (fundamental frequency component)을 추출하고 추출된 기본과 성분의 rms 크기를 센서 시스템의 출력 신호로 이용하였다. Dianov 그룹이 제안한 광섬유 저온 센서의 실험 결

과에서는 액체 헬륨 온도 영역에서의 광섬유 저온 센서로의 사용 가능성을 보였지만, 어븀 이온의 흡수 단면적 (absorption cross-section)이 온도가 감소함에 따라 줄어들면서 1542 nm의 고정된 파장 영역에서 해상도가 감소하는 경향을 보였다. 그런데 1480 nm 레이저 다이오드에 의해 여기된 EDF의 ASE 스펙트럼 (spectrum)이 온도가 감소함에 따라서 그 스펙트럼 세기가 증가하는 현상을 이용하게 되면 [2,3], 1542 nm 근방의 어떠한 고정된 파장에 대해서도 온도가 감소할 경우 광의 세기를 증가시킬 수 있다. 즉 세기 기반 센서 복조기 (demodulator)를 사용하게 되면, 온도가 감소함에 따라 광의 세기가 증가되는 현상을 이용하여 오히려 온도가 감소할 경우에 그 해상도를 증가시킬 수 있다. 일반적으로 1480 nm 레이저 다이오드를 이용하여 EDF를 여기시키는 것이 980 nm 레이저 다이오드를 이용하는 경우에 비해 EDF에서 출력되는 ASE의 온도에 따른 스펙트럼 세기의 변화량이 더 커진다 [2]. 이러한 특성은 광통신용 소자로 사용되는 어븀 첨가 광섬유 증폭기 (erbium-doped fiber amplifier)의 측면에 있어서는 바람직하지 않은 특성이나, EDF에서 출력되는 ASE의 온도 특성을 온도 센서에 이용할 경우에는 유용한 특성이 된다. 따라서, 980 nm 레이저 다이오드 대신 1480 nm 레이저 다이오드를 사용하여 EDF를 여기시킬 경우 센서 시스템의 감도를 향상시키는 효과를 얻을 수 있다. 이와 더불어, 고 해상도의 온도 측정을 위해 레이저 다이오드의 주입전류를 변조시킨 뒤, PD 출력 신호에서 잠금 증폭기를 사용하여 변조 주파수의 기본과 성분의 크기를 측정하게 되면, 잠금 증폭기의 높은 분해능 (10 μ V 수준)을 이용하여 PD 출력 전압을 고 분해능으로 측정하는 것이 가능하다. 그러나, 제안된 센서가 세기 기반 센서이기 때문에, 광원의 출력 세기 요동에 의해 발생하는 잠금 증폭기 출력 전압의 요동이 센서 시스템의 해상도에 미치는 영향도 고려해 주어야 한다.

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電子通信硏究員 先任硏究員

E-mail : dorawoot@chol.com

接受日字 : 2007年 8月 2日

最終完了 : 2007年 8月 17日

2. 본 론

센서 시스템을 구성하기에 앞서 EDF에서 출력되는 ASE 스펙트럼의 온도 특성을 조사하기 위해, 1480 nm 레이저 다이오드를 사용하여 EDF를 여기시킨 뒤 EDF의 주변 온도를 변화시켜 가면서 ASE 스펙트럼의 변화 특성을 광 스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer) 를 이용하여 측정하였다. 사용된 EDF는 어븀 (erbium) 과 알루미늄 (Al) 이 상호 첨가된 (co-doped) EDF이었으며, 어븀의 농도와 최대 흡수율 (peak absorption) 은 각각 ~ 1000 ppm과 10 dB/m @1530 nm이었고, 길이는 1.5 m이었다. 그림 1은 288 K인 경우와 나머지 온도를 (75, 123, 183, 253, 285 K) 간 ASE 스펙트럼 세기의 차이를 보여주고 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 실험에 사용된 EDF에서 출력된 ASE 스펙트럼의 온도에 따른 세기 변화가 1543 nm 근방에서 두드러지는 것을 확인할 수 있다.

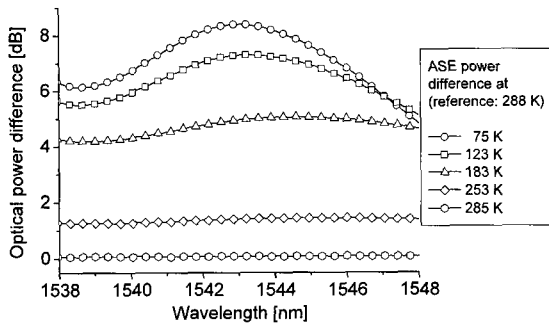


그림 1 온도에 따른 EDF에서 출력된 ASE 스펙트럼 세기의 차이 (288 K 일 경우를 기준)

Fig. 1 ASE power difference between applied temperature and reference temperature (288 K) in the pumped EDF

그림 2는 실험 구성도를 나타내고 있는데, 1480 nm 레이저 다이오드의 광 여기 신호가 EDF를 여기시키고, EDF에서는 ASE가 방출된다. 방출된 ASE의 온도에 따른 스펙트럼 세기 변화를 효율적으로 이용하기 위하여, 그림 3과 같이 1543.52 nm에서 브래그 (Bragg) 반사 파장을 가지는 광섬유 브래그 격자 (Bragg grating) 를 이용하였다. 방출된 ASE가 이 광섬유 브래그 격자와 만나면, 1543 nm 근방 파장 대역의 ASE가 반사되고, 나머지 파장 대역의 ASE는 광 흡수기 (light absorber) 에 흡수되어 소멸된다. 광섬유 브래그 격자에서 반사된 ASE는 2x1 결합기 (coupler) 를 거쳐 PD에 입력된다. 이때, 함수 발생기 (function generator) 를 이용하여 정현적으로 레이저 다이오드의 주입전류를 변조시켜 주면, PD에서 수신되는 ASE의 세기 또한 함수 발생기의 변조 주파수 (modulation frequency) 로 정현적인 변화를 보이게 된다. 따라서 PD의 출력을 잠금 증폭기 (lock-in amplifier) 의 입력 신호로 주고, 레이저 다이오드의 주입전류를 변조시키는 함수 발생기의 클럭 (clock) 신호를 잠금 증폭기의 기준 (reference) 신호로 입력하면, PD의 변조된 출력 신호의 기본과 성분의 진폭과 위상을 추출해낼 수 있다. 여기서 추출해 낸 기본과 성분의 rms 진폭 크기는 외부 온도의 변화의 함수가 되기 때문에, 두 변수 사이의 함수 관계를 통해 외부에서 가해지는 온도를 알아낼 수 있다.

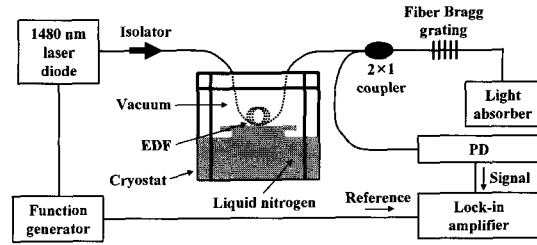


그림 2 실험 구성도

Fig. 2 Experimental setup

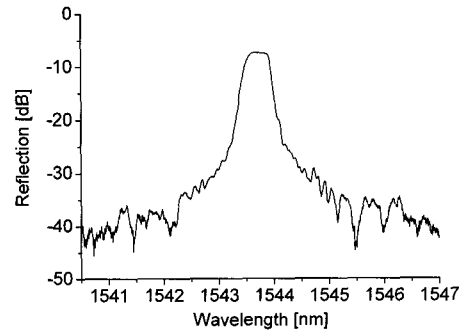


그림 3 실험에 사용된 광섬유 브래그 격자의 반사 스펙트럼

Fig. 3 Reflection spectrum of the fiber Bragg grating used in the experiment

그림 4는 1543.52 nm의 브래그 반사 파장을 가진 FBG에서 반사된 변조된 ASE의 PD 출력 신호가 온도에 따라서 변화하는 양상을 나타내고 있으며, 그림 5는 잠금 증폭기를 사용하여 그림 4의 출력 신호의 기본과 성분의 rms 진폭 크기를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 잠금 증폭기의 rms 진폭 크기 출력이 외부 온도와 지수 감쇄 (exponential decay) 함수 관계를 갖고 있기 때문에, 온도가 감소함에 따라 그 분해능이 증가하고 이에 따라 상온 영역에 비해 저온 영역에서 센서 시스템의 해상도가 증가함을 알 수 있다. 잠금 증폭기의 분해능이 10 μ V임을 감안하면 제안된 센서 시스템의 이론적인 해상도는 액체 질소 온도 영역에서 0.002 K이다. 그러나, 제안된 센서 시스템이 세기 기반 센서이므로, 광원의 요동에 의한 영향을 고려하면 제안된 센서 시스템의 해상도는 상온 영역에서는 ~ 0.4 K, 액체 질소 온도 영역에서는 ~ 0.07 K 정도이었다.

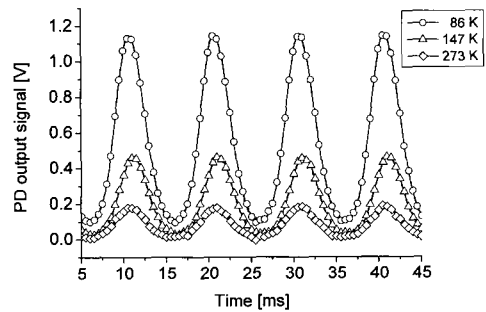


그림 4 1543.52 nm의 브래그 반사 파장을 가진 FBG에서 반사된 변조된 ASE의 PD 출력

Fig. 4 PD output of the modulated ASE reflected from the FBG with the Bragg wavelength of 1543.52 nm

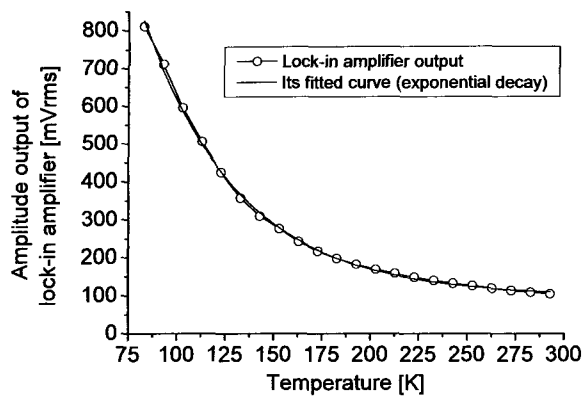


그림 5 온도 대 잠금 증폭기의 출력 특성 곡선

Fig. 5 Output characteristic of the lock-in amplifier with respect to the applied temperature

3. 결 론

본 논문에서는 1480 nm 레이저 다이오드로 여기된 EDF에서 방출되는 ASE의 온도 특성을 이용하고, 레이저 다이오드의 주입전류의 변조를 통하여, 온도가 감소할수록 높은 해상도를 얻을 수 있는 저온 센서 시스템을 제안하였다. 고 해상도의 온도 측정을 위해서 잠금 증폭기를 사용하였으며, 광원의 요동에 의한 영향을 고려하여 실제적으로 측정된 센서 시스템의 해상도는 상온 영역에서는 ~0.4 K, 액체 질소

온도 영역에서는 ~0.07 K 정도이었다. 만약 제안된 센서 시스템에서 입력 광원의 요동을 보완하고, 2×1 결합기 대신 광 서큘레이터 (optical circulator) 를 이용한다면, 해상도는 더 향상될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원의 "High Risk High Return Project" 사업의 일환으로 수행하였음.

참 고 문 헌

[1] E. M. Dianov, A. S. Kurokov, O. I. Medvedko-v, S. A. Vasiliev, D. Baykin, S. Bender, and A. Koretsky, "Erbium-doped fibre as a sensitive element of the cryogenic temperature sensor," *Lasers and Electro-Optics Europe, CLEO, Europe*, p. 243, 1998.

[2] N. Kagi, A. Oyobe, and K. Nakamura, "Temperature dependence of the gain in erbium-doped fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 261-265, February 1991.

[3] J. Jung, H. Nam, J. H. Lee, N. Park, and B. Lee, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating and an erbium-doped fiber amplifier," *Applied Optics*, vol. 38, no. 5, pp. 2749-2751, May 1999.