

4광파혼합을 이용한 온도에 따른 분산천이광섬유(DSF)의 영분산파장 변화 측정

김상혁 · 김동환 · 조재철 · 김선호 · 김상국 · 최상삼
 한국과학기술연구원 광기술연구센터

조 규 만
 서강대학교 물리학과

(1998년 1월 21일 받음, 1998년 4월 8일 수정본 받음)

길이가 15 km 이고, 상온에서의 영분산 파장이 1550 nm인 분산천이광섬유(DSF)에 대해 온도에 따른 영분산파장의 변화를 이론적으로 유도하였고, 이것을 4광파혼합현상을 이용하여 측정하였다. 상온(22°C)에서 59°C까지의 범위의 온도 변화에서 측정된 분산천이광섬유의 영분산파장 변화는 1.19 nm였다. 이로부터 온도 변화에 대한 영분산파장의 변화율은 0.032 nm/°C가 됨을 알 수 있었다. 또한 온도 변화에 따른 영분산파장의 변화가 4광파혼합 효율에 미치는 영향을 계산하여 그 결과가 실험 결과와 유사함을 알아보았다.

I. 서 론

4광파혼합 현상은 비선형 현상으로써 WDM(wavelength division multiplexing)에서의 파장변환과 OTDM(optical time division multiplexing)에 사용되는 광PLL(phase locked loop) 회로에서의 광신호의 위상변화 검출, 그리고 광DEMUX 회로에서의 광샘플링 등에 이용되고 있다.^[1-3]

분산천이광섬유(DSF)는 일반적으로 W 형태의 굴절률 분포를 갖는데 주변 온도가 증가하게 되면 코아와 클래드 간의 굴절률차가 변화하게 된다. 이로인하여 펄스분산이 0이 되는 영분산파장이 변하게 된다. 이러한 영분산파장의 변화는 4광파혼합에서 위상부정합의 변화를 일으켜 4광파혼합의 효율을 감소시키게 된다.

본 논문에서는 분산천이광섬유의 굴절률 분포를 w 형태로 가정하여 온도변화에 따른 영분산파장의 변화를 이론적으로 유도하였고 분산천이광섬유 내에서 발생하는 부분축퇴된 4광파혼합 현상을 이용하여 주변 온도에 따른 영분산파장의 변화를 측정하였다.

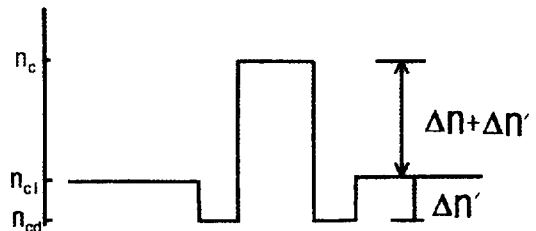
할 때 $\Delta\beta$ 는 $(f_{\text{pump}} - f_{\text{probe}})^2 (f_{\text{pump}} - f_0)$ 에 비례한다. 식 (1)로부터 여기광의 파장이 영분산파장과 일치하는 경우에 $\Delta\beta$ 는 0이 되어 4광파혼합의 효율이 최대가 됨을 알 수 있다.^[4] 한편, 굴절률 분포가 그림 1과 같이 W 형태인 분산천이광섬유에서 색분산은 $M_2(\lambda) = \frac{\Delta n (1 + \delta)}{c \lambda} V(Vb)''$ 와 같이 표현되는데 여기서 첫째항은 물질분산(material dispersion)이고 두 번째 항은 도파로분산(waveguide dispersion)이다.^[5] 따라서 영분산파장 λ_0 는 코아와 내부클래드의 굴절률차를 Δn , 내부클래드와 외부클래드의 굴절률차를 $\Delta n'$ 이라고 할 때 $\frac{V(Vb)''}{c M_2(\lambda)} \Delta n (1 + \delta)$ 이 되고, 여기서 $\frac{V(Vb)''}{c M_2(\lambda)}$ 는 파장만의 함수이므로 이것을 C_1 이라고 하면 $C_1(\Delta n + \Delta n')$ 으로 표현되는데, 이 때 $\Delta n \gg \Delta n'$ 이라고 가정하면 영분산파장은 대략 Δn 에 비례 한다고 가정할 수 있다. 그러므로 영분산파장의 온도에 따른 변화 $\frac{d\lambda_0}{dT}$ 는 아래 식과 같이 코아와 클래드의 굴절률차의 온도에 따른 변화에 비례하게 된다.

II. 이론적 배경

분산천이광섬유 내에서의 부분축퇴된 4광파혼합 효율 η 은 광섬유의 광손실을 0이라고 가정할 때,

$$\eta \propto \frac{\sin^2(\Delta\beta L/2)}{(\Delta\beta L/2)^2} \quad (1)$$

으로 표현되어 위상부정합 $\Delta\beta$ 에 대해 sinc 함수의 제곱에 비례하게 되며, 여기서 L은 광섬유 길이이고 여기광(pump) 주파수를 f_{pump} , 탐지광 주파수를 f_{probe} , 영분산파장 주파수를 f_0 라



$$\Delta n = n_c - n_{cd} \quad \Delta n' = n_{cd} - n_{cl}$$

그림 1. W 형태의 광섬유 굴절률 분포.

$$\frac{d\lambda_o}{dT} = C_1 \frac{d(\Delta n)}{dT} \quad (2)$$

따라서 온도가 변화하면 Δn 이 변화하게 되고 이것은 광섬유의 영분산파장을 변화시키므로 결국은 4광파혼합의 위상부정합 변수 $\Delta\beta$ 가 변화하게 된다. 즉, 임의의 온도 T에서 여기광을 그때의 영분산파장과 일치시켜 4광파혼합 신호의 세기가 최대가 되도록 하여도 온도 T에서는 위와같은 이유로해서 위상부정합이 0이 되지 않으므로 4광파혼합 신호의 세기가 감소하게 된다. 이 때, 여기광의 파장을 변화시켜 위상부정합의 값이 0이 되는 즉 4광파혼합 신호의 세기가 최대가 되는 파장을 찾으면 이 파장이 온도 T에서의 영분산 파장이 된다.

III. 실험

실험 장치는 그림 2와 같다. 여기광은 파장가변(1500 nm-1580 nm) 레이저다이오드이고 탐지광은 DFB-LD(1554.2 nm)이다. 광섬유증폭기 EDFA1과 EDFA2에 의해 두 광원의 세기를 증가시켜 각각 6 dBm이 되게 하였다. 이 두 광을 3 dB 광섬유결합기를 사용하여 분산천이 광섬유(corning제품, l=15

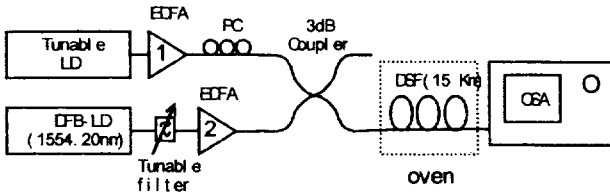


그림 2. 실험장치 구조. PC; 편광조절기, DSF; 분산천이광섬유, OSA; Optical Spectrum Analyzer.

km, 굴절률분포; SEGCOR DSF)에 동시에 입사시키고 분산천이 광섬유로부터 출사되는 4광파혼합 신호의 스펙트럼을 optical spectrum analyzer(분해능=0.05 nm)를 사용하여 관측하였다. 먼저 여기광파장을 상온에서의 분산천이광섬유의 영분산파장인 1550 nm에 맞추어 고정시키고 4광파혼합 신호가 최대(-17 dBm)가 되도록 편광조절기(PC)를 조절하여 여기광과 탐지광의 편광방향을 일치시켰다. 광섬유 드럼이 내장된 오븐의 온도를 증가시키면서 4광파혼합 신호의 세기를 관측한 결과 그림 3과 같이 온도 상승에 따라 진동하며 점차로 감소하는 현상을 보였다. 이러한 현상의 원인을 알아보기 위해 오븐의 온도를 22도, 43도, 51도, 59도로 변화시켜 각각의 경우에 여기광을 0.05 nm씩 변화시키면서 4광파혼합 신호의 세

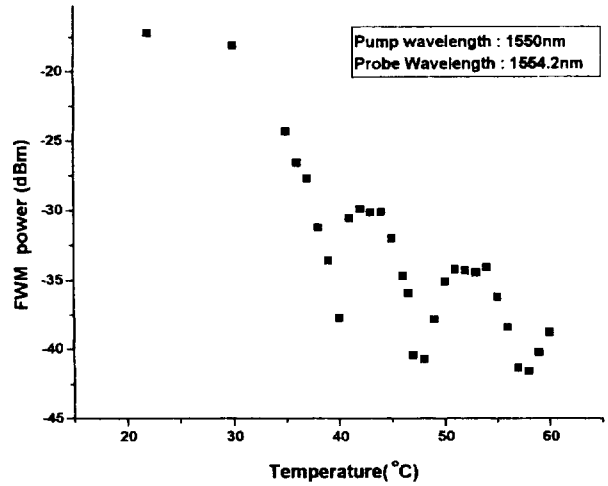


그림 3. 온도에 따른 4광파혼합 세기의 변화.

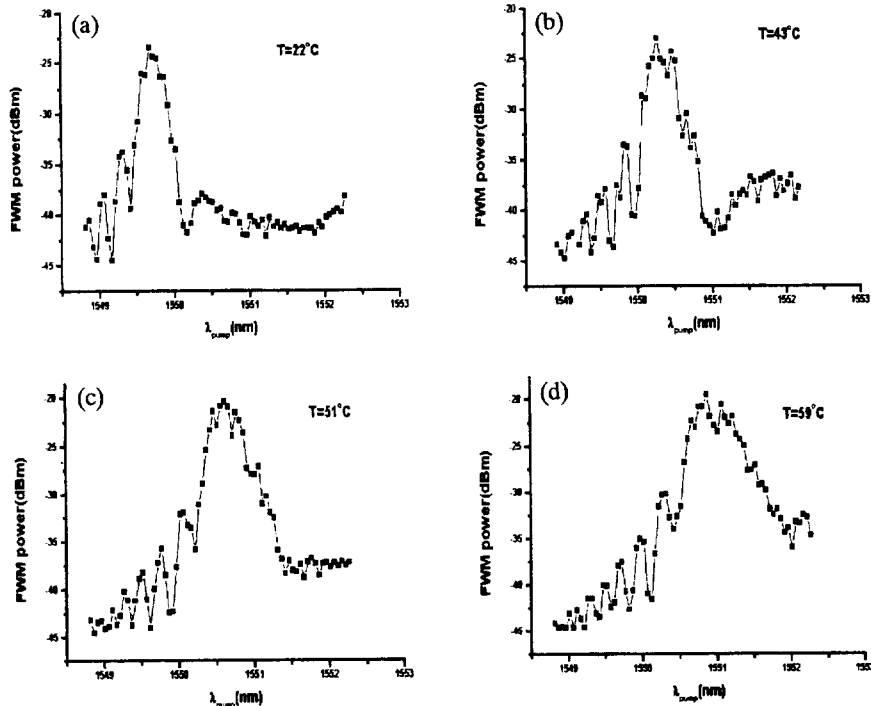


그림 4. 온도와 여기광 파장 변화에 따른 4광파혼합 세기의 변화. (a) 22°C, (b) 43°C, (c) 51°C, (d) 59°C

기 변화를 관측하였다. 이 결과는 그림 4와 같다. 그림 4로부터 각각의 온도에서 4광파혼합 신호의 세기가 여기광의 파장 변화에 따라 복잡한 모양을 보이고 있는데, 앞에서 논의한 바와같이 4광파혼합의 효율이 분산천이광섬유의 광손실을 0이라고 가정할 때, sinc 함수의 제곱에 비례하기 때문이다. 4광파혼합의 세기가 최대가 되는 여기광 파장이 각각의 온도에서 분산천이광섬유의 영분산파장에 해당한다. 따라서 그림 4-(a), (b), (c), (d)로부터 온도 상승에 따라 광섬유의 영분산파장이 장파장으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이는 온도가 상승하면 광섬유의 코어와 클래드의 굴절률이 변화하여 결국 광섬유의 분산특성이 변화하게 되고 이것이 4광파혼합 발생시에 효율에 관여되는 위상부정합의 크기를 변화시켜 그림 4와 같은 결과를 나타내게 된 것으로 추측된다. 이 실험으로부터 그림 3의 결과를 다음과 같이 유추할 수 있다. 즉, 처음에는 여기광의 파장이 상온에서의 영분산파장에 일치하고 있었으나 온도가 증가하게 되면 영분산파장 값이 점차 증가하여 위상부정합 변수 $\Delta\beta$ 값도 따라서 증가하게 되며 이로 인해 4광파혼합

의 세기가 sinc 제곱 함수의 형태로 측정된 것으로 판단된다. 그림 4로부터 4광파혼합의 세기가 최대인 여기광의 파장 즉, 영분산파장을 그 때의 온도에 대해 그려보면 그림 5와 같이 된다. 그림 5로부터 영분산파장은 온도 증가에 따라 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 이로부터 계산된 온도에 따른 영분산파장 변화율은 $0.032\text{nm}/^\circ\text{C}$ 이 된다. 이 결과는 1994년 Hiroshi onaka 등이 1.1 km 길이의 분산천이광섬유에서 측정 한 결과와도 거의 일치하고 있다.^[6] 온도에 따른 영분산파장 λ_0 의 변화에 의한 4광파혼합의 효율의 변화 형태를 알아보기 위해 실험에서와 같이 탐지광의 파장은 1554.2 nm로 고정시키고 그림 4에서 측정된 4개의 영분산파장을 가정하여 각각의 경우에 여기광파장을 변화시켜가며 4광파혼합 효율을 계산한 결과 그림 6과 같이 되었다. 그림 6으로부터 4광파혼합 효율은 영분산파장들과 탐지광파장에서 최대가 되며 그 변화 양상이 실험에서 얻은 결과인 그림 4와 유사함을 알 수 있다.

IV. 결론 및 토의

이 실험으로부터 4광파혼합의 세기가 최대인 여기광의 파장 즉, 영분산파장은 온도에 따라 선형적으로 변화하며 사용된 분산천이 광섬유의 경우에 온도에 따른 영분산파장 변화율은 $0.032\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 으로 측정되었다. 한편, 식 (2)의 계수 C_1 의 값은 Luc B. Jeunhomme^[5]로부터 9.6×10^4 (nm) 이고 코어와 외부클래드의 첨가물을 Ge이라 가정하면, 측정된 분산천이광섬유의 굴절률 분포로부터 계산된 $\frac{d(\Delta n)}{dT}$ 의 값(5×10^7)으로부터 온도 변화에 따른 영분산파장의 변화율을 계산하여 보면 $0.048\text{ (nm}/^\circ\text{C})$ 로 나오는데 $\Delta n'$ 을 무시하지 않고 계산하면 $0.0317\text{ (nm}/^\circ\text{C})$ 의 값을 얻을 수 있다. 영분산파장과 탐지광파장의 간격에 따른 4광파혼합 효율의 변화형태에 대해 계산하여 그 양상이 실험에서 얻은 것과 잘 일치 함을 알 수 있었다. 이상으로부터 온도변화에 따라 분산천이 광섬유의 굴절률분포가 변하여 결국 광섬유의 영분산파장이 변하고 이것에 의해 4광파혼합의 효율이 변하게 되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. Ducellier, M.B. Bibey, IEEE Photonics Technol. Lett., **8**, 530 (1996).
- [2] T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi, K. Uchiyama, and M. Saruwatari, Electron. Lett., **32**, 840 (1996).
- [3] M. Saruwatari, IEICE Trans. Commun., E78-B, 635 (1995).
- [4] K. Inoue, IEEE J. Lightwave Technol., **10**, pp.1663 (1992).
- [5] Luc B. Jeunhomme, "SINGLE-MODE FIBER OPTICS" (MARCEL DEKKER, Inc. New York, 1983).
- [6] H. Onaka, K. Otsuka, H. Miyata, and T. Chikama, IEEE Photonics Technol. Lett., **6**, 1454 (1994).

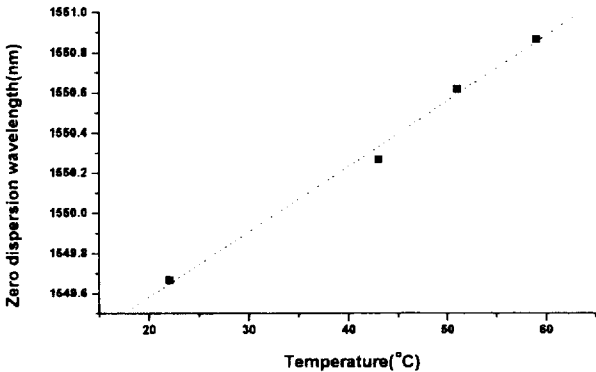


그림 5. 온도 변화에 따른 영분산파장 변화.

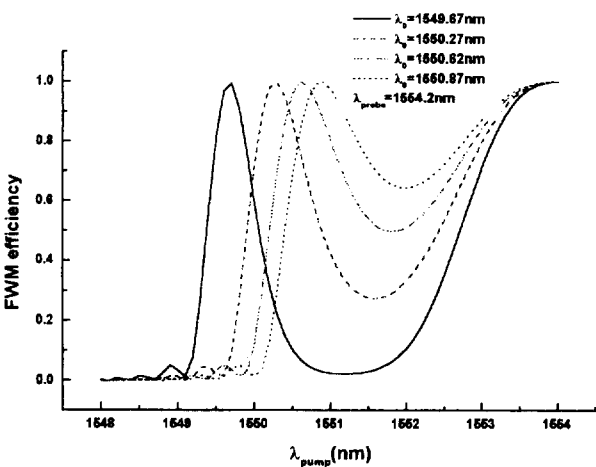


그림 6. 영분산파장과 탐지광 파장 간격에 따른 4광파혼합 효율 변화(탐지광파장=1554.2 nm).

Measurement of temperature dependence of the zero dispersion wavelength using Four-Wave Mixing in DSF

Sang Hyuck Kim, Dong Hwan Kim, Jae Cheol Jo, Sun Ho Kim

Sang Kuk Kim and Sang Sam Choi

*Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology
Seoul, Korea*

Kyu Man Cho

Department of Physics, Sogang University, Seoul, Korea

(Received January 21, 1998, Revised manuscript received April 8, 1998)

We derived an equation showing the temperature dependence of the zero-dispersion wavelength and measured the temperature dependence of the zero dispersion wavelength using four-wave mixing in dispersion shifted fibers in the range of 22°C~59°C. From the experimental results, we found that the zero-dispersion wavelength is increased as the temperature around DSF increases and its temperature dependence is 0.032 nm/°C. Also, the calculated behavior of FWM efficiency coincided with the experimental result.