

# 게르마늄 도핑 광섬유를 이용한 라만 광섬유 레이저의 개발

## 5th order cascaded Raman fiber laser using Ge-codoped fiber

임영은\*, 오경환\*, 김동환\*\*

\*광주과학기술원 정보통신공학과, \*\*한국광기술원 광시스템팀

[youngeun@gist.ac.kr](mailto:youngeun@gist.ac.kr)

광대역 증폭기의 개발과 아울러 고출력 광섬유 레이저의 개발이 다양하게 이루어지고 있는 가운데,<sup>[1]</sup> 특히 유도 라만 산란특성을 이용한 광섬유 레이저가 지속적으로 개발되고 있다.<sup>[2]</sup> phosphosilicate 광섬유를 이득 매질로 하여 저가의 광섬유 레이저를 구현하는가 하면<sup>[3][4]</sup>, 게르마늄 도핑 광섬유를 이득 매질로 한 고효율의 광섬유 레이저가 꾸준히 개발되고 있으며,<sup>[5]</sup> 다파장 레이저의 개발 등의 여러 가지 광섬유 레이저 개발 가능성의 폭을 확장시키고 있다. 본 논문에서는 위의 선행 기술을 바탕으로 게르마늄 광섬유를 이용한 5차 연쇄 라만 공진기를 구성하여, 실제 라만 광섬유 증폭기에 적용한 발진 파장, 1445 nm 인 레이저를 구현하고, 그 특성을 논의하였다.

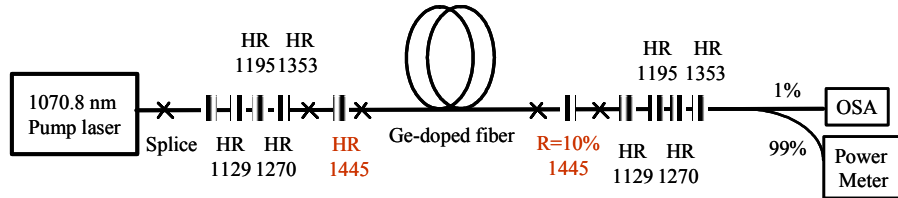
### 실험 및 결과

그림 1은 라만 광섬유 브래그 격자를 사용한 5차 연쇄라만공진기(Cascaded Raman Oscillator) 이다. 라만 광섬유 매질로 사용한 게르마늄 도핑 광섬유는 도핑농도, 23 mol%로 라만 이득 지수(Raman gain coefficient)가 22 dB/kmW 이다. 광섬유의 단일모드 임계 파장은 900 nm, 코어/클래딩 크기가 3.2 $\mu$ m/110 $\mu$ m 이다. 그리고 광섬유의 기저 손실은 1310, 1480 nm에서 각각 1.4, 1dB/km 로 측정되었다.

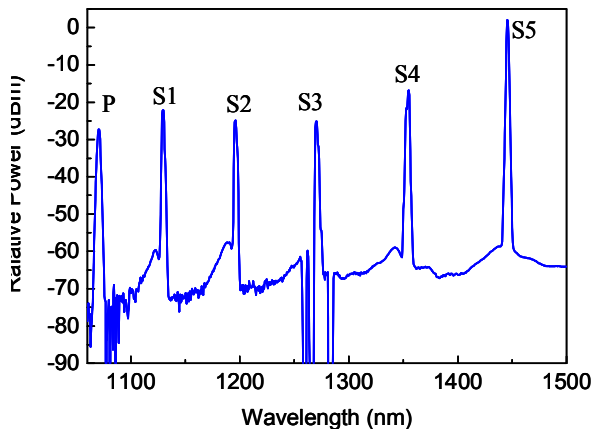
연쇄 라만 광섬유 공진기의 펌프 광원은 이터븀 도핑 더블 클래딩 광섬유 레이저로서 출력 파장은 1070.8 nm, coupling 효율 83 % 로 최대 출력 파워는 17.76 W이다. 실제 펌프 레이저의 입력파워는 최대 12.76 W 로 제한하였다. 5차 연쇄 라만 광섬유 레이저 공진기를 구성할 브래그 격자는 게르마늄 도핑 광섬유의 라만 스토크스 전이 약 430 ~ 490 cm<sup>-1</sup>를 바탕으로 설계된 것으로 1차부터 4차까지 브래그 격자의 중심파장은 각각 1129, 1195, 1270, 1353 nm 이다[그림 1]. 각각의 격자는 오직 14xx nm 대역에서 최대한 유도산란 문턱 값을 낮추기 위한 것으로 반사율을 최대 99% 이상으로 하였다. 레이저 발진 파장은 1445 nm 단일 파장으로 C 밴드 고립 라만 광섬유 증폭기의 유효 펌프 대역(1550 nm)로 하였다.<sup>[6]</sup> 최종 출력 단에서의 1445 nm 브래그 격자의 반사율을 10%로 하여, 1445 nm에서 출력을 최대화하였다. 반사율이 높을수록 유도산란 문턱 값(Threshold power)을 낮출 수 있는 장점이 있는 반면, 반사율을 낮춤으로서 1445nm 에서의 출력 파워는 상대적으로 높아지고, 반사된 값이 다음 라만 스토크스 전이에 미치는 영향을 최소화 시킬 수 있기 때문이다. 본 실험에서 이중 광섬유와의 접합 손실은 광섬유 레이저의 효율과 밀접한 관련이 있다. 특히 게르마늄 광섬유는 코어 3.2 $\mu$ m로 단일 광섬유(9 $\mu$ m)와의 용착 접속 손실이 1480 nm에서 약 0.7 dB 로 게르마늄 광섬유의 기저 손실을 고려하면, 공진기에서 손실이 누적되어 레이저 발진 효율을 저해한다.<sup>[6]</sup> 이러한 접합 손실을 줄이기 위해서 이중 광섬유의 Tapering 조건을 잡고 접합손실을 0.4 dB 이하로 줄일 수 있었다.

그림 2는 입력 펌프 8.3 W에서 5차 라만 광섬유 레이저 발진 스펙트럼으로 1445 nm에서 레이저 발진이 순조롭게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 1차부터 4차 스토크스 전이 파장(S1-S4) 브래그 격

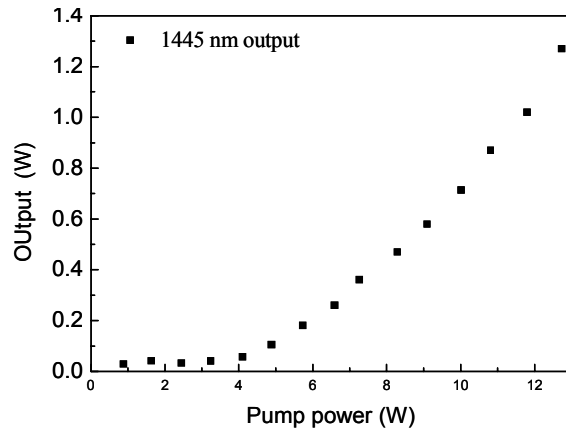
자와 맞물려 있고, 각각의 출력파워는 수 mW 이하임을 확인할 수 있다. 그림 3은 5차 스토크스를 레이저 발진 출력 파워를 입력펌프 파워 대비 출력 파워를 보여주는 그래프이다. 위의 광섬유 레이저의 발진 특성을 간단히 살펴보면, 레이저의 임계 문턱 값은 4.98 W로 최대 출력 파워 1.27 W, 레이저의 발진 효율은 약 16.5 % 이다. 향후 이중 광섬유의 접합손실을 최소화 하고, 게르마늄 광섬유의 길이를 변화시키거나 브래그 격자의 반사율을 조정하는 등의 보완실험을 통해 라만 광섬유 레이저의 발진 효율을 증가시킬 수 있도록 할 것이다.



[그림 1] 5차 게르마늄 도핑 광섬유를 이용한 연쇄 라만 광섬유 레이저 실험 구성도



[그림 2] 라만 광섬유 레이저 발진 스펙트럼



[그림 3] 1445 nm 라만 광섬유 레이저의 입력 펌프 대비 출력 파워

### 참고문헌

1. C. Headley, "Configurable multiple-wavelength all-fiber laser for efficient stable Raman amplification", OFC 02, Technical Proceeding, TuB1, 8-9(2002)
2. A.N. Guryanov, et al, "Raman gain and laser generation in germania-doped core optical fibers 1.1~2.2 um spectral range", OFC 05 Technical Proceeding, OFB6, (2005)
3. E.M. Dianov, et al. "Phosphosilicate fiber: simple high-power cw 1.24 and 1.48 um Raman lasers", CLEO 98, Technical Proceeding, CWE2, 225 (1998)
4. E.M. Dianov, et al. "Three-cascaded 1407nm Raman laser based on phosphorous-doped silica fiber", Optics Lett. 25, 402-404, (2000)
5. M. Y. Zhao, et al. "Grating-free nth order cascaded Raman fibre lasers using highly Ge-doped low loss fibre", Optics Express Vol. 12, No. 17, 4053-4058 (2004)
6. F. Leplingard, et al. "Modeling of Multi-wavelength Raman fiber lasers using a new and Fast Algorithm", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 16, No. 12, 2601-2603 (2004)