

# 실리콘 입자가 함유된 광섬유의 3차 비선형 광특성

## Nonlinear optical properties of the optical fiber incorporated with Si particles

문성배\*, 김복현, 프라모드 R. 와테카, 한원택

광주광역시 북구 오룡동 1번지 광주과학기술원 정보통신공학과 특수광섬유 연구실

Tel: 062-970-2215 Fax: 062-970-2204 E-mail: [wthan@gist.ac.kr](mailto:wthan@gist.ac.kr)

### 서 론

일반적으로 널리 반도체 재료인 실리콘(Si)은 무극성 공유결합을 가진 결정구조로서 자외선 영역의 광흡수 계수가 크며 비교적 적은 값의 삼차 비선형 광특성을 지닌다고 알려져 있다. 그런데, 실리콘 입자의 크기가 나노 사이즈로 작아지거나 또는 실리카 유리 내부에 불순물로 실리카 내부에 defect를 형성할 때에는 양자갇힘(quantum confinement) 현상이 일어나고 이로 인해 실리콘 내부에 새로 생겨난 엑시톤(exciton)에 의해서 전도대(conduction band)와 가전자대(valence band) 사이에 준 직접 천이(quasi-direct transition)가 일어나게 된다. 이로 인하여 일반 실리콘에서는 나타나지 않는 비교적 큰 값의 삼차 비선형 광특성이 나타나게 된다<sup>(1-2)</sup>. 본 연구에서는 실리콘(Si) 입자가 코어에 첨가된 광섬유를 제조하고 실리콘이 첨가되지 않은 비교군 광섬유와의 삼차 비선형 비교 측정을 통하여, 광섬유 내부에 Si 첨가가 실제 비선형 광특성에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보았다.

### 실 험

Modified chemical vapor deposition (MCVD)공정과 더불어 실리콘의 첨가를 위한 용액 첨가법(solution doping method)을 사용하여 광섬유 모재를 제조하였다<sup>(3)</sup>. Si 입자를 광섬유 코어에 첨가하기 위하여, 에탄올을 용매로 하고 여기에 0.3 g의 Si 파우더(Kojundo, SIE17PB, 입자크기<4 $\mu$ m)를 넣어서 만들었다. 만들어진 용액의 총량은 2.5 ml 이며, 충분히 섞인 상태에서 도핑하기 위해서 도핑하기 바로 전까지 계속 저어주었다. 비교를 위한 실리콘 비첨가 광섬유의 경우, 중간에 용액의 도핑 처리 과정을 생략하였으며 MCVD 공정은 같은 조건으로 수행하였다. Si 입자를 도핑하는 경우 Si의 녹는 점이 1450°C 부근이므로 MCVD 공정의 높은 온도에서는 쉽게 산화가 되어버린다. 이를 방지하기 위해서 소결 시 공정 온도를 1800°C 이하로 유지하였으며 산소의 유입을 차단하고 대신 불활성 기체인 헬륨(He)을 사용하였다.

제조된 광섬유의 코어와 클래드의 굴절률 차이는 0.005 였으며 코어 지름은 5.6  $\mu$ m이었다. 차단(cutoff)파장은 Si이 첨가된 광섬유와 Si이 첨가되지 않은 광섬유의 경우 각각 1250 및 1260 nm이었다. 제조된 광섬유의 비선형성을 확인하기 위해서 cut back 방법을 사용하여 광흡수 특성을 측정하였다. 또한, 장주기 격자쌍방향을 이용하여 간섭무늬(interference fringe)의 이동 측정하고 이로부터 3차 비선형 계수를 계산하였다<sup>(4)</sup>. 광흡수 특성 및 간섭무늬 이동은 상온(25°C)에서 optical spectrum analyzer(OSA)를 사용하여 측정하였다.

### 결 과

Si이 첨가된 광섬유 및 Si를 넣지 않은 광섬유의 광흡수 스펙트럼을 그림 1에 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 Si이 첨가되지 않은 광섬유에 비하여 Si이 첨가된 광섬유 경우 510~1300 nm 영역에서 새롭게 형성된 광흡수 밴드가 관찰되었다. 이러한 광흡수 특성은 기존의 실리콘 이온빔 주입을 통한 실험<sup>(6)</sup>과 비슷한 결과를 보여주었는데, 이는 광섬유모재 제조 시 주입된 실리콘 입자에 의한 광섬유 코어 부분에서의 defect 발생 또는 실리콘 나노 입자의 형성에 의한 것으로 여겨진다.

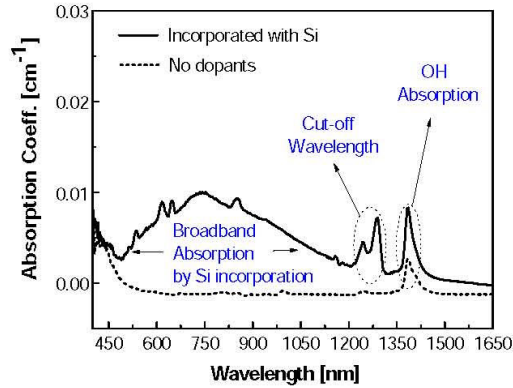
광섬유의 3차 비선형 측정을 위해서 사용된 방법인 장주기 격자쌍을 이용한 간섭무늬 변화의 측정 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 나타난 간섭무늬의 이동은 펄핑광원의 크기에 비례하여 커지고 있음을 알 수 있는데, 그 이동크기는 다음 식에 의하여 광섬유의 3차 비선형과 연관된다.

$$n_2 = \frac{A_{eff} \lambda_p}{L_{eff} 2b S} \left( \frac{\Delta\lambda}{P_{pump}} \right) \quad (1)$$

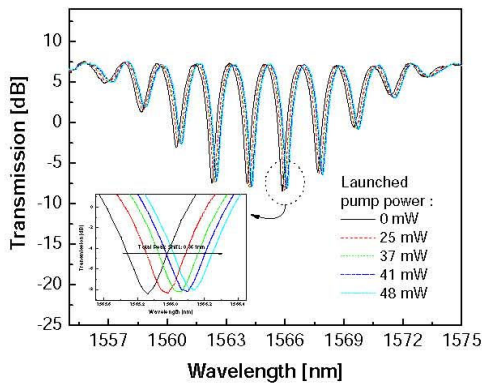
여기서,  $A_{eff}$  와  $L_{eff}$  는 각각 광섬유의 유효면적(effective area)과 유효길이(effective length)에 해당한다.  $S$ 는 간섭무늬간격을 나타낸다.  $b$  는 편광상수를 나타내는데 일반적으로 단일 모드 광섬유의 경우 2/3 으로 주어진다.  $\lambda_p$ 는 측정에 사용된 간섭무늬의 극대 파장위치를 나타낸다.  $P_{pump}$ 는 펄핑 광원의 세기이고  $\Delta\lambda$ 은 간섭무늬의 이동크기이다. 보다 자세한 측정방법 및 계산 과정은 참고문헌(4)에 기술되

었다.

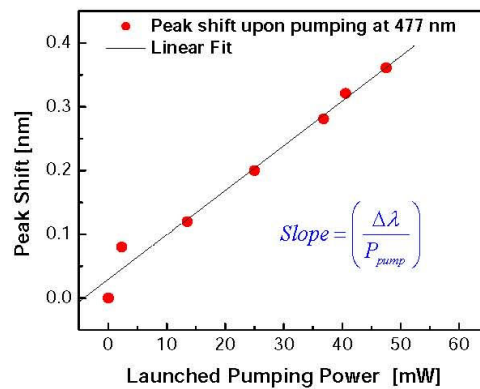
그림 3 에 펌핑 광원의 세기에 따른 간섭무늬의 이동을 나타내었다. 그림 3 에 주어진 기울기(slope)로부터 식 (1)을 사용하여 Si 이 첨가된 광섬유의 3 차 비선형( $n_2$ )을 계산하였으며 그 값은  $2.22 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{W}$  이었다. 같은 방법으로 Si 가 도핑되지 않은 광섬유의 3 차 비선형을 측정하였고  $0.05 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{W}$  로 얻어졌다. 따라서, 광섬유 제조 시 Si 입자 첨가에 의하여 3 차 비선형 광특성이 약 40 배 이상 증가함을 확인할 수 있다. 표 1 에 3 차 비선형 계산에 사용된 광섬유의 광학변수를 비교 정리하였다.



[그림 1] Si 이 첨가 및 첨가되지 않은 광섬유의 광흡수 스펙트럼 비교



[그림 2] 펌핑 광원(477nm)의 세기 변화에 대한 광섬유의 fringe 변화



[그림 3] 펌핑 세기에 따른 기울기 그래프

[표 1] 광섬유의 삼차 비선형 측정값 비교

	$p$ (nm)	S (nm)	$P_{\text{pump}}$	$\Delta$ (nm)	$n_2$ ( $10^{-16} \text{ m}^2/\text{W}$ )
Si -doped	1565	1.8	47.5 mW	0.361	2.22
No dopants	1548	3.07	135 mW	0.051	0.05

### 결 론

MCVD 공정 및 용액첨가법을 사용하여 Si 입자가 첨가된 광섬유를 제조하였다. 광흡수 측정결과 일반 광섬유에서 관찰되지 않는 510~1300 nm 영역에서 강한 광흡수 밴드가 나타남을 확인하였다. 장주기 격자쌍방향을 이용하여 3 차 비선형을 측정하였으며, Si 입자가 첨가된 광섬유의 경우 그 값은  $2.22 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{W}$  이었다. 이는 Si 입자가 첨가 되지 않은 광섬유에 비하여 40 배 이상 증가된 것이다.

### 참 고 문 헌

1. S. Furukawa, et al., Phys. Rev. B **31**, 2114 (1985).
2. S. Furukawa, et al., Phys. Rev. B **38**, 5726 (1988).
3. J. S. Cho, et al., OFC 2001, ThC4-1 (2001).
4. Y. H. Kim, et al., Opt. Lett., **27**, 580-582 (2002).
5. S. Moon, et al., OECC 2006, pp. 6D2-4-1~2, 2006.