

전광섬유 음향광학 소자를 이용한 광섬유 표면 플라즈몬 센서

Fiber-optic Surface Plasmon Sensor Using All-fiber Acousto-optic Device

김영민, 염동일, 임용준, 이병호
 서울대학교 전기컴퓨터공학부
 byoungho@snu.ac.kr

표면 플라즈몬 공명에 기반한 광센서를 이용하여 화학적, 생물학적 센싱을 하는 연구가 진행되어 왔다. 표면 플라즈몬 공명을 여기시키는 방법은 광섬유나 격자, 또는 프리즘을 이용한 방법이 있는데, 특히 광섬유에 기반한 표면 플라즈몬 공명 센서는 다른 표면 플라즈몬 공명 센서에 비해 작은 크기, 견고함, 조밀한 구조와 원격 센싱이 가능하다는 점 때문에 큰 장점⁽¹⁾을 갖고 있다. 또한 음향광학 조정필터⁽²⁾는 표면 플라즈몬 공명 센서에서 파장 선택기로 사용할 수 있다. 음향광학 조정필터의 주파수 대역을 조정함으로써, 회절된 빛의 파장은 공명 조건을 만족하도록 선택할 수 있다. 본 논문에서는 전광섬유 음향광학 표면 플라즈몬 센서를 제안하였다. 기존의 음향광학 조정필터 대신에 전광섬유 음향광학 조정대역 필터가 사용되었다. 먼저 광섬유 기반의 표면 플라즈몬 공명에 대한 스펙트럼 특성을 분석하고, 쿤(Kuhn) 알고리즘을 이용하여 표면 플라즈몬 모드의 분산 곡선을 계산하였으며, 광섬유의 코어 모드와 비교하였다. 또한 위의 분석에 의해 결정된 최적 파장 구간에서 동작하는 전광섬유 조정 대역 필터를 직접 제작하였다.

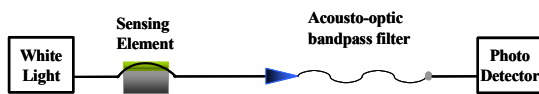


그림 1. 광섬유 기반의 표면 플라즈몬 센서

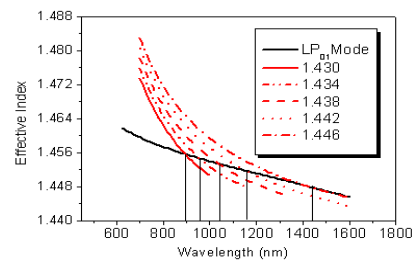


그림 2. 광섬유 기본 모드와 표면 플라즈몬 모드의 분산 곡선

광섬유 기반의 플라즈몬 센서는 그림 1과 같다. 먼저 단일모드 광섬유의 클래딩 부분을 연마하여, 그 위에 얇은 금속 박막을 입히고, 조정 가능한 대역 필터와 센싱 소자로 사용하기 위해 전광섬유 음향광학 조정대역 필터를 만들었다. 표면 플라즈몬 모드의 특성 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\left[\frac{k_3^{(1)}}{\epsilon_1} + \frac{k_3^{(m)}}{\epsilon_m} \right] \left[\frac{k_3^{(s)}}{\epsilon_s} + \frac{k_3^{(m)}}{\epsilon_m} \right] e^{k_3^{(m)}d} = \left[\frac{k_3^{(1)}}{\epsilon_1} - \frac{k_3^{(m)}}{\epsilon_m} \right] \left[\frac{k_3^{(s)}}{\epsilon_s} - \frac{k_3^{(m)}}{\epsilon_m} \right] e^{-k_3^{(m)}d}$$

여기서 e_L , e_s , e_m 오버레이, 기판, 금속의 유전률이다. $k_3^{(i)}$ 는 $k_3^{(i)} = [k^2 - \epsilon_i(\omega/c)^2]^{1/2}$, ($k = k_R + ik_i$) 로 정의되는데 k 는 표면 플라즈몬 모드의 전파상수이며 d 는 금속 두께다. 그림 2는 광섬유의 기본 모드와 오버레이의 굴절률에 대한 Symmetric Bound 표면 플라즈몬 모드의 분산 곡선이다. 여기서 사용된 Cargile 오일의 굴절률은 실효값을 구하기 위하여 Cauchy 방정식을 이용하여 다시 계산하였다. 표면 플라즈몬 모드는 단파장(700 - 1100 nm)에서 코어 모드보다 훨씬 분산적인데, 장파장(1300 - 1500 nm)으로 갈수록 코어 모드와 비슷해진다. 비록 표면 플라즈몬 공명 조건이 금속 두께나 광섬유의 종류에 따라 다르지만, 전반적인 특성은 그림 2와 매우 유사할 것이다.

그림 3은 표면 플라즈몬 공명의 스펙트럼 특성을 나타낸 것인데, 무편광 소스에 대한 표면 플라즈몬 공명의 투과 스펙트럼을 계산한 결과를 보여주고 있다. 그림 3의 안에 포함된 그림은 표면 플라즈몬 공명의 실험 결과를 보여주는 것으로, 계산한 결과와 비교적 일치함을 알 수 있다. 계산에서 파장에 의존하는 커플링 세기를 고려하지 않았기 때문에 투과 깊이가 실험과 약간 차이가 나며, 실험 결과에서 볼 수 있는 약간의 잡음 현상은 멀티모드에서 관찰되는 intermodal 간섭현상에서 비롯된 것이다. 우리는 표면 플라즈몬 공명 센서의 민감도와 스펙트럼 특성을 고루 만족하도록 동작 파장대역을 1100 nm로 선택하였다.

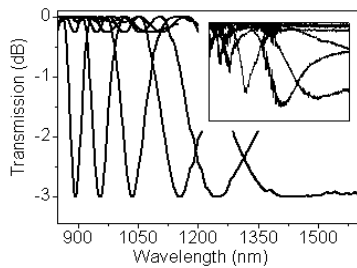


그림 3. 표면 플라즈몬 센서의 스펙트럼 특성

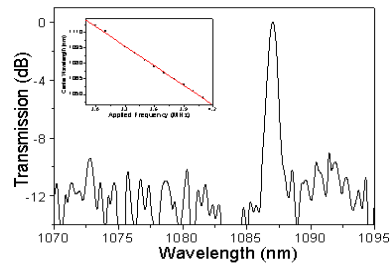


그림 4. 전광섬유 음향광학 조정 대역 필터의 투과 스펙트럼

1100 nm 근방에서 동작하는 표면 플라즈몬 공명 센서를 위한 전광섬유 음향광학 조정 대역 필터를 제작하였다. 전광섬유 음향광학 조정 대역 필터는 기존의 방식⁽³⁾을 이용하였는데, 1300 nm대역에서의 코어 모드 블록커를 만들기 위하여 hollow core fiber를 이용하였다. 그림 4는 3.45 MHz의 음향 주파수가 적용된 필터의 투과 스펙트럼을 나타낸 것이다. 필터는 그림 4에서 볼 수 있는 것처럼 연속적이고, 선형적으로 조정이 가능하다. 제작된 대역 필터는 표면 플라즈몬 공명의 특성을 독립적으로 모니터링하기에는 어려움이 있기 때문에, 표면 플라즈몬 공명 센서에 바로 적용하기는 힘들지만, 광섬유의 클래딩을 에칭하거나 two mode 광섬유를 사용하면 이 문제를 해결할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. R. Alonso, F. Villuendas, J. Tornos, and J. Pelayo, "New 'in-line' optical-fibre sensor based on surface plasmon excitation," Sensors and Actuators A 37/38, 187-192 (1993).
2. M. J. Jory, G. W. Bradberry, P. S. Cann, and J. R. Sambles, "A surface-plasmon-based optical sensor using acousto-optics," Measurement of Science and Technology 6, 1193-1200 (1995).
3. S. Choi, T. J. Eom, J. W. Yu, B. H. Lee, K. Oh, "Novel all-fiber bandpass filter based on hollow core fiber," IEEE Photonics Technology Letters 14, 1701-1703 (2002).