

# 회절한계를 극복한 새로운 광응답소재

(주) 디피아이솔루션스 이종우

## 1. 서론

고속으로 광신호를 처리하기 위한 스위칭 소자는 2차 비선형 광학계수를 이용하는 전기광학 효과를 적용하여 전기적으로 광신호를 제어하는 스위칭 소자와 반도체 광증폭기를 이용한 스위칭 소자, 그리고 광섬유 자체의 3차 비선형 광학 효과를 이용하여 광신호를 스위칭 하는 소자등이 연구되고 있다.

전기 광학 광 스위칭 소자나 반도체 광스위칭을 이용한 전광 스위칭 소자에 비해 3차 비선형 광학 효과를 이용한 광스위칭 소자는 전하의 실질적인 이동을 동반하지 않기 때문에 광응답속도가 현저히 빠르지만, 기존의 비선형 광학 물질들의 미약한 3차 비선형 광학 효과로 인하여 스위칭 소자의 길이가 길어지기 때문에 소자의 집적화가 매우 어렵다는 문제점을 안고 있다.

또한 광을 이용한 소자는 광의 회절한계라는 물리적 한계로 인해 소자의 크기를 수백나노미터이하로 만드는 데 제약을 받아왔다. 따라서 전광소자의 제품화가 촉진되기 위해서는 광응답속도가 향상되고 회절한계를 극복할 수 있는 새로운 물질의 개발이 요구되어져왔다.

## 2. Peapod형태의 금속 나노입자 복합체

### 2.1. 연구배경

표면 플라즈몬 공명을 이용하면 물질의 3차 비선형 특성을 증가시킬

수 있기 때문에 광응답속도를 향상시킬 수 있으며, 표면 플라즈몬 공명이 광의 간섭이나 반사특성이 아닌 흡수특성이기 때문에 광의 회절한계를 극복할 수 있다. 표면 플라즈몬 공명을 나타내는 구조로 금속-유전체-금속 터널링 접합이 활발히 연구되어져 왔으며, 광조사시 금속에서 생성된 Hot electron 들이 드리프트되거나 확산되어 나노스케일의 유전체를 터널링 효과에 의해 빠르게 이동함으로써 광응답속도를 향상시키게 된다.

이러한 금속-유전체-금속 구조로는 금속나노입자를 포함하는 복합체 구조, 나노 박막형태등 벌크나 박막형태가 주로 연구되어져 왔으나 최근들어 광회절한계를 극복할 수 있다는 장점 때문에 peapod형태의 1차원 복합체 형태에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

## 2.2. 제조방법

금을 포함하는 peapod형태의 실리카 나노와이어를 제조하는 방법은 다음과 같다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 금을 SiNx가 코팅된 Si기판에 얇게 (~7nm)증착하고 반대편에는 금이 코팅된 실리콘 웨이퍼를 샌드위치형태로 플라즈마 반응기안에 설치한다. 초기에는 고순도 수소를 혼입하여 수소 플라즈마를 생성시키고 1분후 암모니아를 포함한 수소를 도입하여 20분간 반응시킨다. 반응기내 압력은 50~70torr, 온도는 530°C를 유지한다.

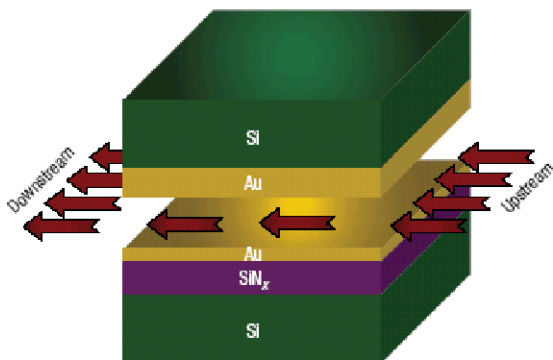


그림 1. 금속 peapod 나노와이어 제조

### 2.3. Peapod형태의 나노와이어 제조

제조된 나노와이어의 길이는 그림 2에서 볼수 있듯이 반응시간에 따라 증가하다가 20분후부터는 약 3 $\mu\text{m}$ 로 거의 일정해짐을 알수 있다.

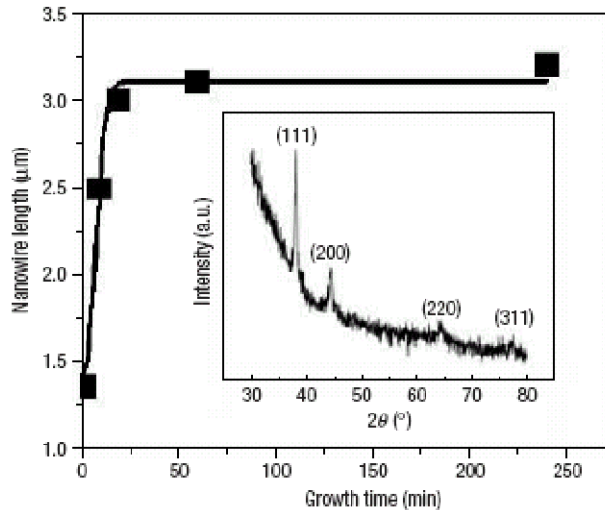


그림 2. 시간에 따른 나노와이어의 길이 변화

시간에 따라 초기에는 촉매역할을 하는 금나노입자가 부착된 실리카 나노튜브가 생성되며 (그림 3a) 고온에서 유동성을 갖는 금나노입자가 모세관 현상에 의해 나노튜브의 안으로 흘러들어가 채우기 시작한다. (그림 3b) 이렇게 나노튜브안을 채운 금은 중간중간이 끊어진 나노와이어 형태를 이루게 되는데 (그림 3c) 반응기내의 수소 기체의 흐름 특성으로 인해 생성된 실리카 나노튜브의 길이가 늘어나면서 금 나노와이어의 중간중간이 더욱 멀어지고 외벽에는 실리카가 지속적으로 증착되어 불연속적인 금나노와이어가 포함된 실리카 나노와이어가 생성된다. (그림 3d) 결국 그림 3e와 같이 peapod형태의 금 나노입자가 포함된 실리카 나노와이어가 생성된다.

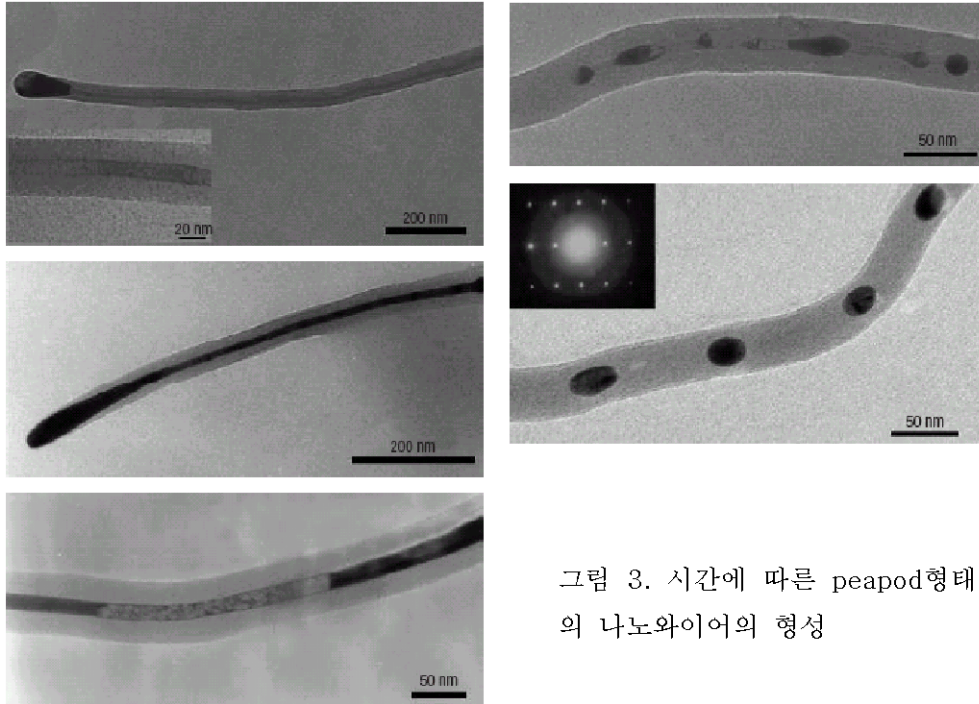


그림 3. 시간에 따른 peapod형태의 나노와이어의 형성

#### 2.4. Peapod형태의 나노와이어의 광응답특성

제조된 Peapod형태의 나노와이어의 앙상블을 이용하여 광응답특성을 측정하여 보면 그림 4에서와 같이 특정 파장에서 급격한 저항치의 변화를 확인할 수 있다. 이는 나노와이어가 공명할 수 있는 표면 플라즈몬 공명 주파수가 나노와이어의 종류에 따라 다르기 때문이며, 532nm에서 공명하는 물질의 경우 그림 4와 같은 광응답특성을 나타내게 된다. 이러한 결과는 Peapod형태의 나노와이어가 회절한계를 뛰어넘는 광응답소재로 적용될 수 있음을 의미하며, 금속 및 유전체의 종류, 나노입자의 크기등에 따라 서로 다른 파장에 응답하는 나노와이어를 제조할 수 있다.

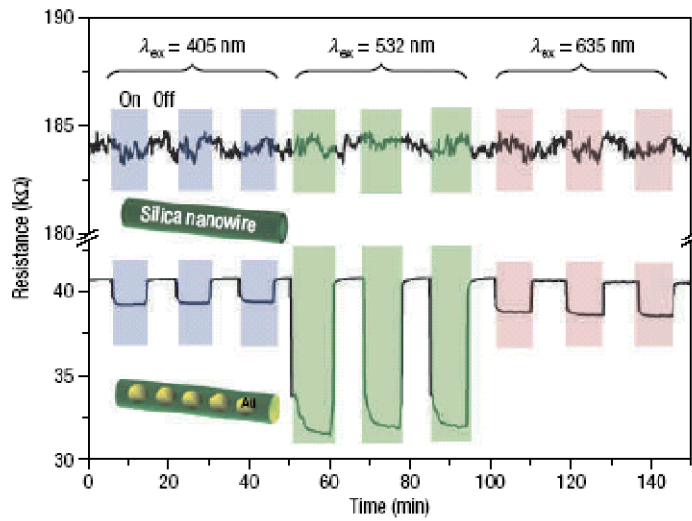


그림 4. Peapod형태의 나노와이어의 광응답특성

## 응용분야

- 파장에 따라 조절이 가능한 나노크기의 광스위치
- 나노크기의 광도파로
- 센서

## 용어

### 3차 비선형 감수율 (Third-order nonlinear susceptibility)

물질에 전기장이나 자기장 같은 외부장(external field)이 가해지면 분극(polarization)이 유도되어지며, 이러한 외부장과 외부장(external field)에 의해 유도된 분극과의 관계를 살펴보면 가해진 장의 세기가 약한 경우 식(1)과 같이 감수율  $\chi^{(1)}$ 의 선형함수로 나타낼 수 있다.

$$p = \chi^{(1)}E \quad (1)$$

그러나 물질에 laser beam과 같은 센 전기장을 가하면 외부장에 의한 물질의 분극은 식(1)과 같이 선형 감수율만으로 표현될 수 없으며 외부장에 대한 멱급수(power series)로 나타낼 수 있다. 분자 하나 단위의 미시적 비선형성은 아래식 (2)와 같이 주어진다.

$$p = \alpha E + \beta E^2 + \gamma E^3 + \dots \quad (2)$$

$p$  : 외부장에 의하여 유도된 분자 분극 (induced molecular polarization)

- E : 국부 전기장의 세기 (local electric field strength)
- $\alpha$  : 선형분자 감수율 (linear molecular susceptibility)
- $\beta$  : 2차 분자 감수율 (second molecular susceptibility)
- $\gamma$  : 3차 분자 감수율 (third molecular susceptibility)

한편 거시적 비선형성은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots \quad (3)$$

P : 외부장에 의하여 전계(bulk system)에 유도되는 분극 (polarization)

$\chi^{(1)}$  : 선형전계 감수율 (linear bulk susceptibility)

$\chi^{(2)}$  : 2차 비선형 전계 감수율 (second-order nonlinear optical bulk susceptibility)

$\chi^{(3)}$  : 3차 비선형 전계 감수율 (third-order nonlinear optical bulk susceptibility)

### 표면 플라즈몬 공명(surface-plasmon-resonance: SPR)

일반적으로 어떤 물체의 표면에 광이 입사되면 흡수 또는 투과되고 나머지는 반사되지만, 대부분의 입사광이 반사광으로 변하지 않고 물질의 표면을 따라 전달되는 경우가 있다. 특정 파장의 광이 금속에 조사되면 대부분의 광에너지가 자유전자로 전이(Hot electron)되는 공명현상이 일어나게 되며, 그 결과 표면파가 생성되는 데 이러한 현상을 표면 플라즈몬 공명이라고 한다.

### 회절한계(diffraction limit of light)

회절 한계는 빛에 의한 모든 패턴 특성은 파장의 절반보다 작은 크기를 가질 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 광을 이용한 기록, 표시는 이러한 물리적인 한계로 인해 수백나노미터 이하로 소자를 제작하는 것이 제한된다.

### 참고문헌

1. Ming-Shien Hu, et al. Photosensitive gold-nanoparticle-embedded dielectric nanowires, *Nat Mat.*15, 102-106 (2006)
2. Philip Walther, et al. De Broglie wavelength of a non-local four-photon state, *Nature*, 429, 158-161 (2004)