

다중 광집계를 이용한 나노센서 제작

*남찬혁¹, 홍대희¹, 이종훈², 이상훈³

¹ 고려대학교 기계공학과, ² 고려대학교 신소재공학부, ³ 두원공대 자동차과

Nano Sensor Fabrication with Optical Tweezers

*C. H. Nam¹, D. H. Hong¹, J. H. Lee², S. H. Lee³

¹ Dept. of Mech. Eng., Korea Univ., ² Dept. of Mat. Eng. Korea Univ., ³ Dept. of Auto. Eng. Doowon Tech. Col.

Key words : Optical Tweezers, Nano Sensor, Micro/nano Device

1. 서론

나노기술이 발전함에 따라 마이크로/나노 크기의 물체를 정밀하게 조작할 수 있는 기술의 중요성이 날로 증대되고 있다. 따라서 산업계 및 학계에서 마이크로/나노 크기의 소자를 조작하고, 나아가 마이크로/나노 크기의 2D/3D 구조물을 제작할 수 있는 기술을 확보하기 위한 여러 가지 노력들이 진행되고 있다. 이러한 관점에서 1986년 Ashkin[1]에 의해 고안된 광학 다중 광집계(Optical Tweezers)는 기존에 연구되고 있는 방법과 비교하여 많은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 나노소자를 직접 개별 제어할 수 있는 다중 광집계를 활용하여 가스센서부의 나노소자 부착을 위한 시스템 구성과 방법을 실험적으로 제시한다.

2. 나노소자 포획이론

다중 광집계는 레이저 초점상에서 포획력이 형성되며, 그 힘은 Mie regime과 Rayleigh regime을 통해 설명된다. 두 regime의 차이는 빔의 파장과 포획하고자 하는 물체의 직경의 상대적인 크기에 있다.

Mie regime은 포획하고자 하는 대상의 직경이 레이저 파장에 비하여 클 경우($R > 10\lambda$)에 적용되며, ray optics에 기반하고 있다. 빔이 입자 표면에 부딪칠 경우 빔의 반사와 굴절에 따른 변화로 생기는 증감력(Gradient force)과 빔이 진행하는 방향과 나란한 산란력(Scattering force)이 서로 합력을 이루어 물체를 레이저 초점상에서 포획하게 되며 이 힘은 Ashkin 등[2]에 의해 다음과 같은 식으로 설명된다.

$$F = \frac{n_m P Q}{c} \quad (1)$$

n_m 은 주변매질의 굴절률, P 는 광선의 세기, c 는 빛의 속도, Q 는 무차원의 힘계수이다.

Rayleigh regime은 포획하고자 하는 대상의 직경이 레이저 파장에 비하여 작을 경우($R < 10\lambda$)에 적용되며, 빔을 전자기장으로 취급한다. 전자기장은 쌍극자 진동과 모멘트를 야기하고 쌍전자 입자의 전기를 유발시킨다. 따라서 새로운 전기장 \mathbf{E} 는 기존의 전기장과 새로 생긴 전기장이 서로 중첩되어 형성 된다. Bechhoefer과 Wilson[3]에 따르면 입자의 에너지는 새로운 전기장에 의해 다음과 같이 표현 된다.

$$W = UV = -\frac{1}{2} \mathbf{P} \cdot \mathbf{E} V = -\frac{1}{2} \alpha \epsilon_m E^2 V \quad (2)$$

쌍극자 모멘트 \mathbf{P} 와 전기장 \mathbf{E} 가 연관된 값인 U 는 국소 에너지 밀도이다. V 는 입자의 부피, ϵ_m 은 주변 매질의 쌍전자 상수이고 E 는 전기장의 크기이다. α 는 아래의 수식과 같이 쌍전자 상수의 관계를 표현하는 항이다.

$$\alpha = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_m} - 1 \approx \frac{n_p^2}{n_m^2} - 1 \quad (3)$$

여기서 n 은 굴절률이고 아래 첨자 p 와 m 은 입자와 주변 매질을 나타낸다. 빛의 세기로 인한 공간 변수는 입자의 에너지 변화를 발생시킨다.

Rayleigh regime에 의한 증감력과 산란력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{sc} = n_m \frac{\langle S \rangle \sigma}{c}, \quad F_{gr} = \frac{\rho}{2} \nabla \langle E^2 \rangle \quad (4)$$

n_m 은 주변 매질의 굴절률이고 $\langle S \rangle$ 는 포인팅 벡터의 평균 시간, σ 는 주변 매질의 산란 단면이고 ρ 는 입자의 극성화도이다.

3. 실험장비

다중 광집계는 레이저, 2개의 망원경, fast steering mirror, 대물렌즈로 구성되며, 기본적인 구성 및 수치는 Fig. 1, Table 1과 같다. 다중 광집계는 대물렌즈에 빔을 일정한 크기로 조사하여야 충분한 포획력을 얻을 수 있다. 초기 레이저 헤드에서 나온 빔의 크기는 대물렌즈 입구를 채울 수 있을 만큼 충분하지 않기 때문에 망원경들을 이용해 빔의 크기를 조절한다. 나노소자를 조작하기 위해 레이저 경로 상에 fast steering mirror를 배치하여 회전각도를 조정함으로써 대물렌즈 초점상의 포획평면 위를 레이저 초점이 수평 이동할 수 있게 한다.

4. 실험 및 결과

실험은 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 공정 및 펄스 레이저를 통해 만들어진 금 전극(Au patterned electrode: 폭 15 μ m) 위에 진행된다. 기존에 수용액상에서 다중 빔을

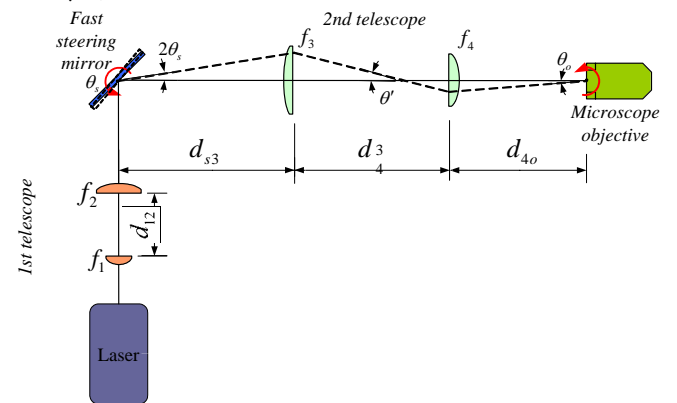


Fig. 1 Schematic diagram of Optical Tweezers and related parameters

Table 1 Design parameters of dynamic optical tweezers

Design parameters	Nomenclature	Designed value
Distance	d ₁₂	140.5 mm
	d _{s3}	75 mm
	d ₃₄	400 mm
	d _{4o}	125 mm
Lens	f ₁	15 mm
	f ₂	125 mm
	f ₃	300 mm
	f ₄	100 mm

이용하여 마이크로/나노 구조물을 만드는 것에서 발전하여, 건조과정을 통해 실제 가스센서로 활용할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 다중 광집계를 사용하여 커버글라스 위에 떠있는 nano-rod 를 포획하고, 상단의 슬라이드 글라스 상에 만들어진 전극 위로 이동시킨 후, 채널 사이에 올라갈 수 있도록 높히고 부착하는 일련의 과정을 보여주고 있다. Nano-rod 를 부착시키고, 증류수를 사용하여 계면활성제가 포함된 용액을 희석시킨다. 레이저 및 외부열원을 차단시킨 후, 상온상태에서 건조과정을 거쳐 나노센서 조립을 마친다. 이전 실험에서 계면활성제 희석과정 없이 건조할 경우 nano-rod 가 모두 유실되는 상황이 발생한다.

Fig. 3의 그림들은 실제 실험 과정을 보여주고 있다. 금 전극은 슬라이드 글라스에 만들어져 있어 화면상에서 검은 구조물로 확인된다. 레이저 빔은 대물렌즈에서 커버글라스를 지나 슬라이드 글라스로 진행하기 때문에 Fig. 3 (c)의 그림과 같이 포획된 nano-rod 가 전극 위에 올라갈 경우, 화면상에 선명하게 보이지 않더라도 잘 포획되어 있다. 기본적으로 Brownian motion 을 하고 있는 nano-rod 를 포획하는데 0.3 W 파워를 이용하며, Fig. 3 (f) 와 같이 nano-rod 를 전극에 부착 할 경우 0.7~0.8W 정도의 파워를 사용한다. Nano-rod 에 0.3W 파워의 레이저 빔을 이용해 외란을 가하여 nano-rod 의 반응을 확인함으로써 확실한 부착여부를 확인한다. 건조가 완료된 후 Fig. 3 (f)와 같이 안정적인 형상을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

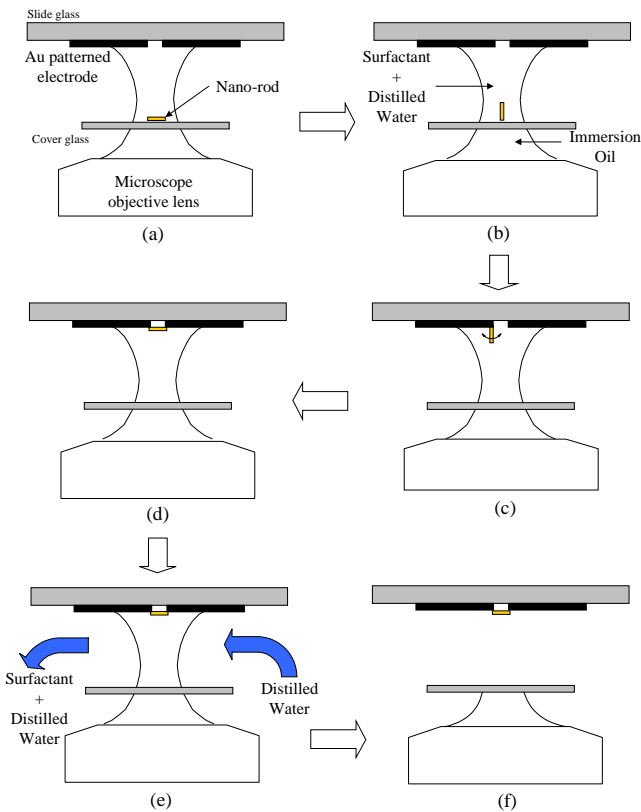


Fig. 2 Schematic diagram to show the process of nano-rod trap, manipulation, and assembly. (a) Freely floating nano-rod with Brownian motion. (b) Vertically trapped nano-rod. (c) Lift up from cover glass to slide glass and move to below the Au patterned electrode. (d) Lay down across the channel and increase laser power for attaching nano-rod to Au patterned electrode (e) Inject distilled water and extract surfactant at the same time. Decrease surfactant density in distilled water. (f) Dry nano sensor at normal temperature.

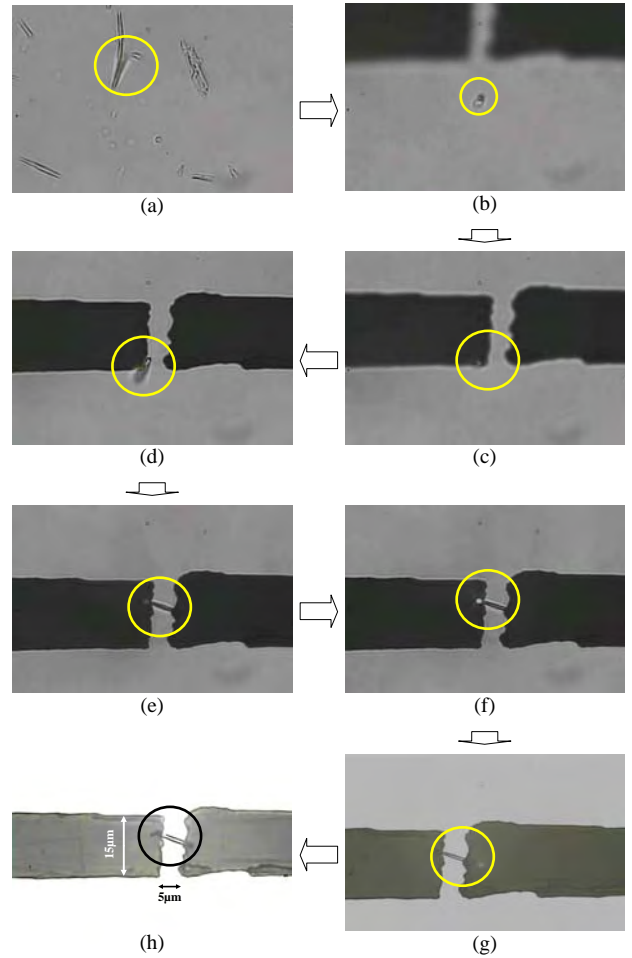


Fig. 3 Assembly process of gas-sensor with a nano-rod (SnO_2). (a) Freely floating nano-rod. (b) Vertically trapped nano-rod and lifted up. (c) Move the nano-rod below an Au patterned electrode. (d) Lay down the nano-rod (e) Place the nano-rod across the channel. (f) Increase laser power to attach the nano-rod. (g) Check the nano-rod states using a low-power laser, and dry the nano sensor at normal temperature. (h) fabricated nano sensor.

4. 결론

본 연구는 다중 광집계를 이용하여 nano-rod 를 포획, 정밀/개별 제어하여 나노센서를 제작한 후, 건조과정을 수행하였다. 이를 통해 앞으로 만들어지게 될 고정밀 초소형 2D/3D 나노센서 제작에 다중 광집계의 높은 활용 가능성을 보였다.

5. 후기

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-041-D00117) 및 2006년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., and Chu S., "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particle," *Opt. Lett.*, Vol. 11, No. 5, pp. 288-291, 1986.
2. Ashkin, A., "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime," *Biophys. J.*, Vol. 61, pp. 569-582, 1992.
3. Bechhoefer, J and Wilson, S., "Faster, cheaper, safer optical tweezers for the undergraduate laboratory," *Am. J. Phys.*, Vol. 70, No. 4, pp. 247-85, 2002.