

4분할 광 검출기 상의 광점 크기가 변위 측정감도에 미치는 영향

이은중 · 이진우 · 고태준*

국민대학교 물리학과, 서울 성북구 정릉동 861, 136-702

(2008년 1월 15일 받음, 2008년 2월 1일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 4분할 광 검출기 상에 입사된 광점의 크기에 따른 optical beam deflection 방식에서의 변위 측정감도의 변화에 대해 살펴보았다. 3 mW의 헬륨-네온 레이저를 사용하여 optical beam deflection 방식의 광학적 변위 측정 장치를 제작하였으며 광 검출기에 도달하는 광점의 크기를 변화시켜가며 제작된 변위 측정 장비가 나타내는 변위 측정감도를 관찰하였다. 또한 광 검출기에 도달하는 optical beam power를 원형의 균일한 분포를 지닌 광점으로 설정하여 광점 크기의 변화에 따른 변위 측정감도를 계산하였다. 측정된 결과와 계산을 통하여 검출기 상에 입사하는 광점의 크기가 작을수록 변위 측정감도가 증가함을 알 수 있었으며 이는 나노미터 급의 변위 측정 장비 개발에 있어 광 검출기에 도달하는 광점의 크기를 최소화함으로써 변위 측정감도를 최적화 할 수 있음을 나타낸다.

주제어 : 광선속 편향, 변위 측정감도, 광점크기

I. 서 론

반도체 공정 기술의 지속적인 발달과 함께 전자소자의 초 소형화는 계속적으로 이루어져 오고 있으며, 또한 마이크로 크기 이하의 소자들의 경우 벌크소자들에 비해 상대적으로 작은 입력 신호로써 기계적인 운동을 유발시킬 수 있기에 기계 소자로서의 기능성도 고려되고 있다[1, 2]. 가장 대표적인 예로 Nanoelectromechanical Systems(NEMS)와 Atomic Force Microscope (AFM)의 프로브로 사용되고 있는 마이크로 캔틸레버를 들 수 있다. NEMS 소자의 경우 1 μ W 대의 작동 전원을 사용하여 나노미터 급의 변위를 유도할 수 있으며 AFM 캔틸레버의 경우 0.1 N/m 이하의 탄성계수를 지닌다 [3, 4].

하지만 이와 같은 나노 기계소자의 경우, 소자의 크기로 인하여 나타나는 변위 역시도 매우 작은 값을 가지게 되므로 직접적인 응용에 있어 큰 제한을 받게 된다. 따라서 나노 기계소자의 응용은 반드시 나노미터 이하의 변위 측정을 가능케 할 수 있는 높은 측정감도를 지닌 변위 측정방식의 개발을 필요로 한다. 특히 상온에서 사용가능한 변위 측정방식으로 광학적 방법이 많이 개발되어오고 있다. NEMS 소자의 경우 광학 간섭계를 통한 변위 측정이 시도되고 있으며, 널리 사용되고 있는 AFM의 경우 캔틸레버의 변위 측정을 위해 optical beam deflection 방식이 응용되고 있다[5, 6].

이러한 광학적 측정방식의 개발에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 할 것은 측정 방식이 가진 변위 측정 감도이다. 나노소자의 크기에 의해 나타나게 되는 나노미터 이하의 기계

적 동작을 관찰하기 위해서는 반드시 높은 변위 측정감도를 지닌 적절한 변위 측정방식이 개발되어야 하며, 또한 적용되는 측정방식들의 변위 측정감도의 최대화가 모색되어야 한다. 특히 광학적 변위 측정방식의 경우 소자의 크기가 측정 시 사용되는 빛의 파장보다 작아지는 회절 한계 이하에서, 소자의 소형화는 광학적 변위 측정방식이 지닌 측정감도를 크게 감소시키게 된다[5, 7].

AFM에서 사용되는 optical beam deflection 방식의 경우 측정하고자 하는 소자로부터 반사되는 빛이 광 검출기로 발산하며 입사하게 되며, 이에 따라 광 검출기와 소자 사이의 거리에 의해 광점의 크기가 변화하게 된다. 이 사실은 소자의 크기에 의한 측정감도의 변화 외에도, 광 검출기에 입사되는 광점의 크기 역시 optical beam deflection방식의 변위 측정감도에 영향을 줄 것으로 기대된다.

본 논문에서는 광 검출기에 입사되는 광점의 크기가 변위 측정감도에 미치는 영향을 살펴보았으며, 이러한 연구를 통해 optical beam deflection 방식의 최적화를 고려해 보았다.

II. 실험 및 이론

Fig. 1(a)는 제작된 optical beam deflection 방식의 변위 측정 장치와 광 경로를 나타내고 있다. 635 nm의 파장을 지닌 3 mW의 헬륨-네온 레이저를 사용하였으며 입사된 빛은 렌즈 1, 렌즈 2와 대물렌즈를 통과한 후 거울에 반사되어 광 검출기에 도달한다. 여기에서 사용된 광 검출기는 4분할 광 검출기로서 네 개의 포토다이오드의 배열로 구성되어 있다. 각각의 포토다이오드에 나타나는 출력신호(S_1, S_2, S_3, S_4)는 검출기에 입사되는 광점의 위치에 의해 결정되는 optical

*Tel: (02) 910-4873, E-mail: tkouh@kookmin.ac.kr

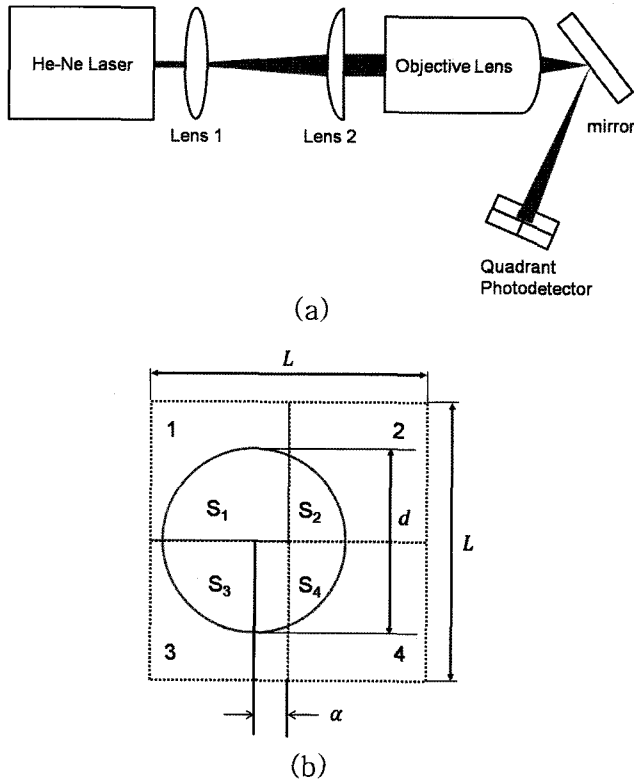


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the displacement detection setup based on the optical beam deflection method. The motion of the mirror changes the position of the optical spot on the photodetector and the distance between lens 1 and lens 2 determines the size of the optical spot. (b) Position of the optical spot (solid line) with a diameter of d within the quadrant photodetector (dotted line). The center of the optical spot is displaced by α . The partial areas of the photodetector are shown as S_1 , S_2 , S_3 and S_4 .

beam power에 따라 다르게 나타나며 이를 통해 수평으로 이동하는 광점의 경우 각 포토다이오드가 출력하는 신호 차 ($\Delta S = (S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)$)를 측정하여 광점의 위치변화를 나타낼 수 있다. 또한, 네 영역에서의 신호의 총합($S = (S_1 + S_2) + (S_3 + S_4)$)을 출력하는 방식으로도 사용할 수 있으며 이를 통해 광 검출기에 입사하는 전체 optical beam power를 결정할 수 있다(Fig. 1(b)). 제작된 변위 측정 장치의 변위 측정감도는 ΔS 를 통해 결정될 수 있으며, 고정된 광점의 크기와 일정한 변위에 대해 ΔS 의 값이 클수록 측정감도가 높다.

거울과 광 검출기 사이의 거리는 75 mm로 설정하였으며, 거울 후면의 fine pitch 나사를 이용하여 거울을 회전시킴으로써 광 검출기상의 광점의 위치를 변화시켰다. 거울 뒤의 나사가 7° 회전하였을 때 광 검출기상의 광점의 변위는 200 μm 로 측정되었고, 계산에 의한 160 μm 와 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 광 검출기 상의 지름 1 mm의 광점이 200 μm 이동한 경우 광 검출기는 95 mV의 신호 변화를 나타냈다. 본

실험에서 사용된 New Focus 사의 4분할 광 검출기(Model 2901)의 경우 1 Hz 대역폭에서 $10^{-7} V_{rms}$ 의 출력 전압 노이즈를 지니고 있으며 이것은 Fig. 1의 변위 측정 장치는 2 Å의 변위 측정감도를 가지고 있음을 의미한다.

광점의 크기가 제작된 변위 측정 장치의 측정감도에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 광 경로 상에 렌즈 1과 렌즈 2를 위치해 놓았다. 렌즈 1과 렌즈 2 사이의 거리는 렌즈 2를 통과한 평행 광이 대물렌즈의 후면렌즈로 입사될 때의 크기를 결정하며, 대물렌즈를 통과하여 거울에 반사된 빛은 발산하면서 고정된 위치에 놓여 있는 광 검출기에 도달하게 된다. 따라서 렌즈 1과 렌즈 2의 간격을 조절함으로써 광 검출기에 도달하는 광점의 지름, d 를 1~7 mm 사이로 변화시켰으며, 각각의 경우에 광점을 수평방향으로 α 만큼 이동하였을 때 나타나는 optical beam power의 차 ΔS 를 측정하였다. 또한 Fig. 1(b)와 같이 광 검출기에 도달하는 광점을 일정한 원형 분포를 지닌 것으로 가정하여 광점의 일부가 광 검출기를 구성하고 있는 각각의 포토다이오드에서 차지하는 면적을 고려하고 이를 통해 광점의 이동시 나타나는 optical beam power의 차, ΔS 를 계산하여 광점의 크기가 측정감도에 미치는 영향을 살펴보았으며 실험적으로 측정된 ΔS 와 비교해 보았다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2는 광점이 수평 방향으로 $\alpha = 200, 400, 600 \mu\text{m}$ 이동하였을 경우 측정된 광점의 크기, d 의 변화에 따른 $\Delta S/S$ 를 나타내고 있다. 광점의 이동에 의한 신호 차 ΔS 에서 광점의 크기에 따라 변화하는 광 검출기에 입사되는 광량의 영향을 보정하기 위해 ΔS 를 전체 신호 S 로 나누어 주었다. Fig. 2를 통해 일정한 변위로 이동한 광점에 대해 측정된 세 경우 모두, $\Delta S/S$ 의 값은 광점이 작을수록 더욱 더 큰 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

또한 균일한 분포의 원형 광점 모델을 사용하여 광점이 일정한 변위로 움직이는 경우들에 대해, 각 포토다이오드 안에서 광점이 차지하고 있는 면적을 고려하고 이를 통해 면적 차 ΔS 와 각 면적의 합 S 를 계산하였다. 계산된 $\Delta S/S$ 의 값을 광점의 크기에 대한 그래프로 나타내었고 그 결과를 실험결과와 비교하였다(Fig. 2). 실험 결과와 같이 계산 결과도 광점의 크기가 작은 영역에서 $\Delta S/S$ 의 값이 크게 나타났으며 이로써 광점이 작을수록 변위 측정감도는 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2에서 $d < L$ 인 경우, 두 결과는 매우 비슷한 값을 보이며 변위가 증가하는 경우 측정감도가 최대값을 가지는 영역이 확대되는 것을 알 수 있다. 또한 광점의 크기 변화에

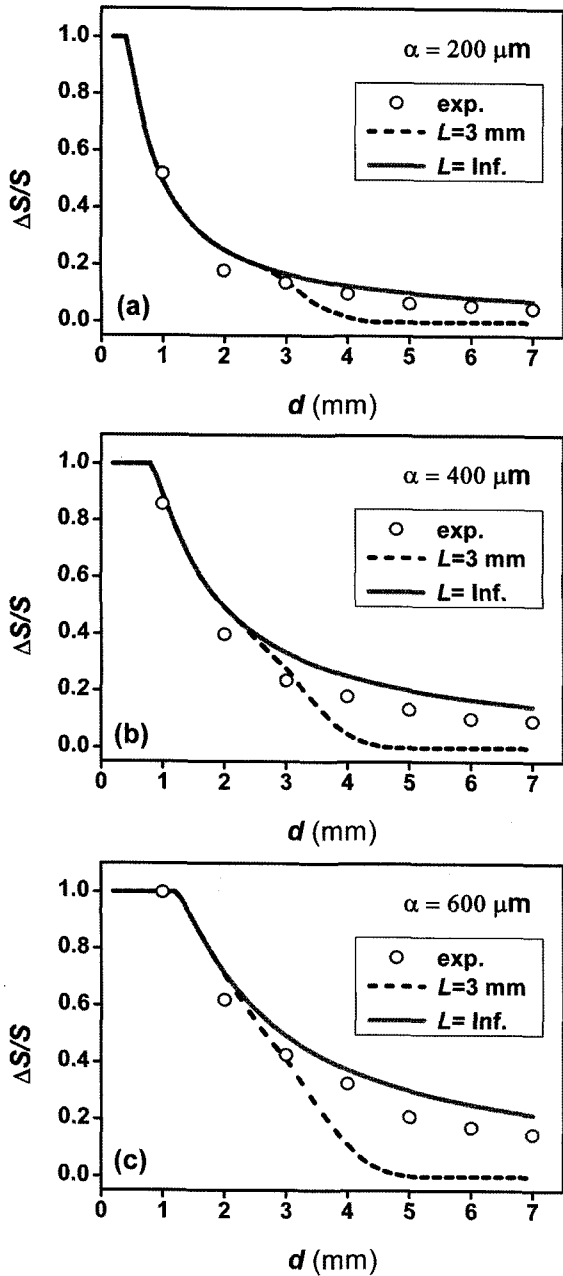


Fig. 2. Normalized output of the quadrant photodetector, $\Delta S/S$ as a function of the diameter of the optical spot displaced by (a) $\alpha = 200 \mu\text{m}$, (b) $400 \mu\text{m}$, and (c) $600 \mu\text{m}$. The dashed line corresponds to the theoretical value obtained by considering a circular optical spot with constant laser intensity. The solid line corresponds to the calculated value by considering the detector to be infinite in size ($L \rightarrow \infty$).

따른 측정결과와 계산에 의한 $\Delta S/S$ 의 값은 일치하는 것을 알 수 있었으나 광점의 크기, d 가 광 검출기의 크기($L=3 \text{ mm}$)보다 커지는 경우 두 그래프는 매우 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

$d \geq L$ 의 경우 실험적으로 측정된 $\Delta S/S$ 의 값은 광점의 크기

가 증가함에 따라 서서히 감소하는 것을 볼 수 있었으나 이와 달리 계산된 결과의 경우 $\Delta S/S$ 의 값은 광점의 크기가 증가함에 따라 매우 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 광 검출기 상에서 지름 5 mm인 광점이 400 μm 만큼 이동하였을 때, 실험적으로 측정된 $\Delta S/S$ 의 값은 0.2인 반면 계산된 결과는 0의 값을 나타낸다. 이와 같이 광점의 크기가 검출기의 크기보다 큰 경우, 입사되는 광점의 일부가 광 검출기를 벗어나게 되어 optical beam power의 손실이 발생하게 되며 이는 계산 결과에서 보이는 바와 같이 $d \geq L$ 의 영역에서 급격한 $\Delta S/S$ 의 감소, 즉 변위측정감도의 감소로 나타나게 된다.

두 결과 간에 나타나는 차이를 이해하기 위해 광 검출기의 크기 L 이 무한히 큰 경우를 고려하여 광점의 이동에 의한 면적 차 ΔS 를 계산했으며 위와 동일하게 광점의 총면적을 통해 광점의 크기 변화가 입사 광량에 미치는 영향을 보정하여 $\Delta S/S$ 를 구하였다. Fig. 2에 나타난 검출기의 크기 L 이 무한히 큰 경우에 계산된 광점의 크기에 따른 $\Delta S/S$ 의 값은 $\alpha = 200, 400, 600 \mu\text{m}$ 의 경우들에 대해 모두 측정된 결과와 유사한 형태의 변화를 보여준다.

광 검출기의 크기가 무한하다고 가정한 것은 광 검출기의 크기에 비하여 광점의 크기가 상대적으로 매우 작다는 사실로도 이해 될 수 있다. 본 실험에서 정의한 광점의 크기는 optical knife edge 방식[8, 9]으로 측정되었으며 Fig. 3에 나타난 바와 같이 optical beam power가 0이 되는 지점으로 결정하였다. 위의 계산에서 사용된 광점의 크기 역시 optical beam power가 0이 되는 지점으로 결정하였고, 결정된 광점의 범위 내에서 일정한 분포의 optical beam power를 가지는 것으로 설정하였다. 이와 달리 Fig. 3에서 측정된 광점의 분포의 경우 일정한 분포가 아닌 가우시안 분포를 따르는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 앞서 나타난 두 결과의 차

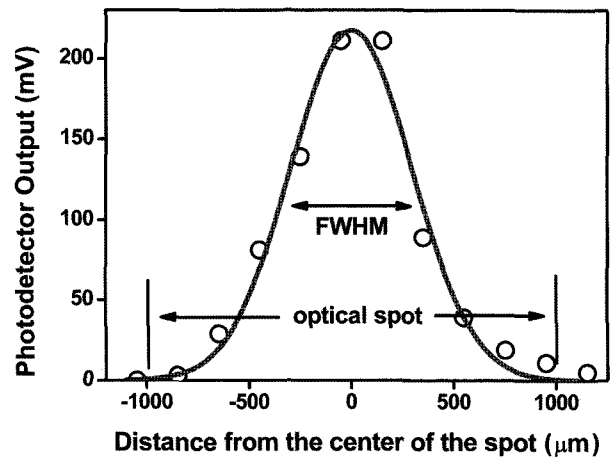


Fig. 3. Measured optical spot profile fitted to the Gaussian distribution. Here, the optical spot size, d is determined to be 2 mm, while the value of FWHM is about 0.7 mm.

이는 실질적으로 검출기가 반응하게 되는 유효 광점의 크기 차이로 이해될 수 있다. 본 실험에서 $\Delta S/S$ 측정 시 광 검출기에 입사된 유효 광점의 크기는 실질적으로 Fig. 3에서 나타난 가우시안 분포로 인한 반폭치(FWHM)와 같이, 연구에서 정의한 광점의 크기보다 작은 것으로 이해할 수 있다. 따라서 실제로 광 검출기에서는 작은 유효 광점으로 측정되기 때문에, Fig. 2의 측정된 $\Delta S/S$ 의 결과는 광 검출기의 크기를 무한대로 가정한 모델의 결과와 유사함을 보인다.

본 논문에서는 광 검출기로 입사되는 광점의 크기가 optical beam deflection 방식의 변위 측정감도에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 광 검출기 상에서 이동하는 광점의 크기를 변화시켜가며 optical beam power의 신호 차 $\Delta S/S$ 를 측정하였고, 또한 광점이 각 포토다이오드에서 차지하는 면적을 계산하여 변위 측정감도를 살펴보았다. 그 결과 광점의 크기가 작을수록 변위 측정감도는 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이것으로 나노 기계소자에서 나타나는 나노미터 이하의 변위를 측정하는 데 필요한 optical beam deflection 방식에 기반을 둔 변위 측정기법의 경우 측정감도의 최적화를 위하여 반드시 광 검출기에 도달하는 광점의 크기를 고려하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수

행된 연구이며 이에 감사드립니다. 또한 본 연구를 위해 많은 도움을 주신 윤성로 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. L. Roukes, *Phys. World*, **14**, 25 (2001).
- [2] H. G. Craighead, *Science*, **290**, 1532 (2000).
- [3] K. L. Ekinci and M. L. Roukes, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 061101 (2005).
- [4] D.W. Lee, T. Ono, and M. Esashi, *Sens. Actuators A*, **83**, 11 (2000).
- [5] T. Kouh, D. Karabacak, D. H. Kim, and K.L. Ekinci, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 013106 (2005).
- [6] S. Alexander, L. Hellems, O. Marti, J. Schneir, V. Elings, and P. K. Hansma, *J. Appl. Phys.*, **65**, 164 (1989).
- [7] D. Karabacak, T. Kouh, C. C. Huang, and K. L. Ekinci, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 193122 (2006).
- [8] A. H. Firester, M. E. Heller, and P. Sheng, *Appl. Opt.*, **16**, 1971 (1976).
- [9] J. M. Khosrofian and B. A. Garetz, *Appl. Opt.*, **22**, 3406 (1983).

Effect of the Incident Optical Spot Size Upon the Quadrant Photodetector on the Optical Displacement Detection Sensitivity

Eun Joong Lee, Jin Woo Lee, and Taejoon Kouh*

Department of Physics, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 15 January 2008, in final form 1 February 2008)

In this paper, we have measured the effect of the optical spot size, incident upon the quadrant photodetector, on the optical displacement sensitivity of the optical beam deflection technique. We have built an optical displacement detection system based on the optical beam deflection method using 3 mW He-Ne laser and measured the displacement sensitivity with changing the optical spot size on the quadrant photodetector. We have also calculated the changes in the optical displacement sensitivity as a function of the incident laser spot size by modeling a circular optical spot with constant laser intensity. Our experimental and theoretical studies show that the optical displacement sensitivity increases with the decrease in the optical spot size. This suggests that in the design of the optical motion detection systems with sub-nanometer sensitivity, the displacement sensitivity can be optimized by reducing the size of the incident optical spot on the detector.

Keywords : optical beam deflection, displacement detection sensitivity, optical spot size