

Moiré 무늬를 이용한 미세 구조물의 평면 움직임 측정에 관한 연구

유봉안^o, 이병호
서울대학교 전기공학부

A Study on the In-plane Motion Measurement of Microstructure
using Moiré Pattern

Bong-An You and ByoungHo Lee

School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

An in-plane motion measurement method using moiré patterns by linear-gratings and cross-gratings, which can be used as micro inertial sensors, micro actuators, and micromachined scanning microscopes is demonstrated. A simple digital image processing method that calculates and analyzes the motion of microstructure from moiré patterns was developed. And using several grating structures fabricated by surface micromachining, we formed moiré patterns and analyzed the motion of microstructure.

I. 서론

최근 들어 반도체 공정을 이용한 마이크로 머시닝의 급속한 발달과 더불어 미세 구조물의 응용에 관한 많은 관심이 일고 있다. 그 중 가속도계, 각속도계 등의 관성센서와 액츄에이터, 그리고 정밀한 위치 제어가 필요한 미세기계 주사 현미경, 고밀도 정보 기억장치 등에서 미세 구조물(관성질량)의 움직임을 측정하는 방법은 전체 시스템의 분해능, 신뢰도 등 즉, 성능을 결정하는 핵심요소이다. 미세 구조물의 움직임 측정 방법으로 최근에 moiré 무늬를 이용하는 방법이 제안되었다[1]. 이 방법은 간섭계 등 다른 광학적 측정 방법과 달리 coherent한 광원을 필요로 하지 않고 신호 대 잡음비 등에서 아주 우수하다.

본 연구에서는 선형 격자와 십자 모양의 격자를 이용하여 각각 직선(1차원) 운동과 평면(2차원) 운동을 측정하는 방법을 고안하였다. 이 측정 방법을 FFT를 이용한 간단한 디지털 이미징 처리 기법을 이용하여 구현하였다. 그리고, 실제로 표면 마이크로 머시닝에 의해서 제작된 격자 구조들에 대하여 moiré 무늬를 형성, 그 움직임을 측정하였다.

II. Moiré 무늬의 형성과 해석

Moiré라는 단어는 원래 물결 무늬의 직물(watered silk)을 뜻하는 프랑스어이다. 이 직물은 겹치게 되면 큰 주기의 밝고 어두운 띠무늬가 나타나게 되는 데, moiré 무늬는 이처럼 작은

주기의 무늬가 겹쳤을 때 나타나는 큰 주기의 무늬를 뜻한다 [2]. Moiré 무늬는 이 무늬를 이루는 격자들의 조그마한 움직임이 확대되어 나타난다. 다시 말해서, moiré 무늬의 변화를 관찰함으로써 격자의 미세한 움직임을 측정할 수 있는 것이다. 이 특성을 이용하여, moiré 측정 방법이 1874년 Rayleigh에 의해 격자선 특성 측정 원리로 제안된 이후, 물체의 변위 및 strain 해석 등 정밀 측정에 주로 사용되어 왔다[3].

그림 1은 두 개의 선형 격자에 의해 나타나는 moiré 무늬를 나타내고 있다.

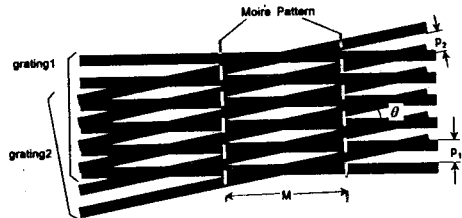


그림 1. 선형 격자에 의해 형성되는 moiré 무늬

이 moiré 무늬의 주기와 방향은 그림 2와 같이 이 현상을 역 격자 공간, 즉 공간 주파수 공간에서 해석하면 간단히 알 수 있다. 각 격자를 격자에 수직이며 크기가 $2\pi/(\text{주기})$ 인 공간 주파수 벡터(\vec{k})로 표시하면, moiré 무늬 격자의 공간 주파수 벡터는 이 벡터들의 차로 나타난다. 즉, 실공간에서 moiré 무늬는 이 벡터(\vec{m})에 수직인 방향으로, 주기가 $2\pi/|\vec{k}_1 - \vec{k}_2|$

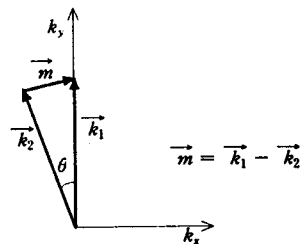


그림 2. 공간 주파수 공간에서의 moiré 무늬 형성

로 나타난다.

두 선형 격자들의 주기(p)가 같고 θ 만큼 서로 기울어져 있으면 moiré 무늬의 주기는 $p / 2\sin(\theta/2)$ 가 된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 두 격자 중 하나가 격자에 수직인 방향으로 그 격자의 주기만큼 움직이면, moiré 무늬 역시 그 무늬의 주기만큼 이동하게 된다. 따라서, 그 격자의 움직임이 $1 / 2\sin(\theta/2)$ 만큼 확대되어 moiré 무늬에 나타나게 된다. 그리고, 격자가 격자선 방향으로 움직이면, moiré 무늬에는 아무런 영향을 주지 못하기 때문에, moiré 무늬를 이용하게 되면, 격자의 특정한 방향으로의 움직임에만 민감하게 반응하는 감지 시스템을 구현할 수 있다.

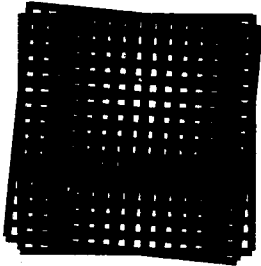


그림 3. 십자 모양의 격자에 의해 형성된 moiré 무늬

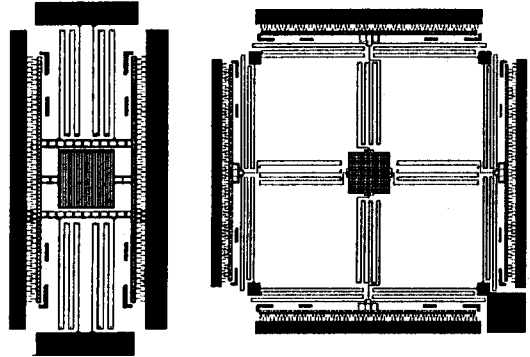
한편, 그림 3처럼 십자 모양의 격자를 사용하면, 격자의 xy 방향 움직임이 모두 확대되어 나타나는 역시 십자 모양의 moiré 무늬를 얻게 된다. 그 해석 방법은 위 선형 격자에서의 방법을 xy 각 축에 적용하면 된다. 따라서, 이를 이용하여 격자의 평면 움직임을 측정할 수 있는 감지 시스템을 구현할 수 있다.

이 방법을 이용하여 미세 구조물의 움직임을 측정하기 위해서는 CCD 카메라 등으로부터 입력되는 moiré 무늬 이미지로부터 그 움직임 변위를 계산하는 이미지 처리 과정이 필요하다. 주기적인 무늬의 움직임은 그 공간 주파수 성분의 위상 변화로 나타난다. 따라서, 입력되는 이미지를 FFT(fast fourier transform)을 통해 moiré 무늬의 주파수 성분을 추출한 다음, 그 위상을 계산하여, 그 전 이미지에서의 위상과 비교하면 그 상대적인 그 움직임(변위)을 얻을 수 있게 된다.

III. 미세 구조물의 설계 및 제작

그림 4는 설계한 layout이다. 구조물의 재질은 다결정 실리콘이고, 각 격자구조의 크기는 $(150\mu\text{m})^2$, 격자의 주기는 $6\mu\text{m}$ 이다. 양끝의 comb drive에 의해 전기적 구동이 되게 설계하였다.

그림 5는 위 구조물을 표면 마이크로 머시닝으로 제작할 때의 공정 순서를 보인 것이다. 실리콘 웨이퍼에 절연막 및 보호막으로, 800Å의 thermal SiO₂를 형성하고 그 위에 2500Å의 실리콘 Nitride막을 LPCVD로 형성한다(그림 5(a)). 그 후 희생층으로 사용될 3 μm 두께의 APCVD PSG를 증착한 다음(그림 5(b)), anchor 부분을 패터닝하고 식각한다(그림 5(c)). 다음에



(a) 선형 격자구조

(b) 십자 모양의 격자구조

그림 4. 설계된 미세 격자 구조의 layout

구조물로 사용될 3 μm 두께의 다결정 실리콘을 605°C에서 LPCVD로 형성한다(그림 5(d)). 증착된 다결정 실리콘의 패터닝을 위해서 1 μm 의 APCVD PSG를 증착한 다음(그림 5(e)), PSG와 다결정 실리콘을 RIE로 패터닝하고 식각한다(그림 5(f)). 그 후, HF(49%)용액으로 희생층을 제거한 다음, 탈이온수(DI water), 메탄올로 세척한 다음 p-dichlorobenzene 승화 건조 방법[4]을 이용하여 세척액을 증발시켜 구조물을 완성한다(그림 5(g)).

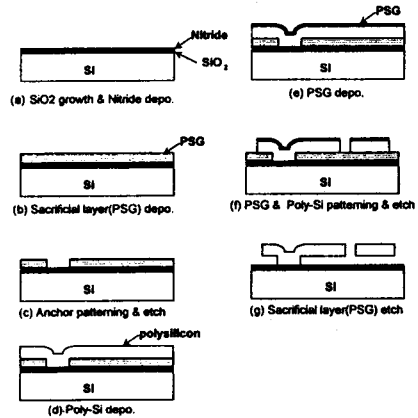
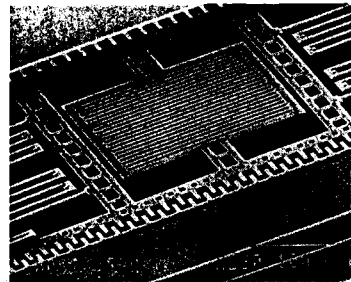
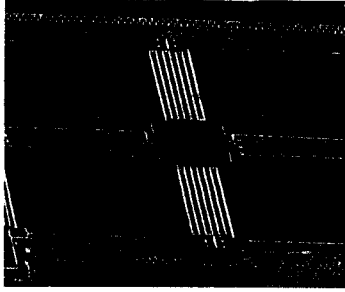


그림 5. 미세 격자 구조물의 제작 공정

그림 6은 완성된 미세 격자 구조물을 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다.



(a) 선형 격자구조



(b) 십자 모양의 격자구조

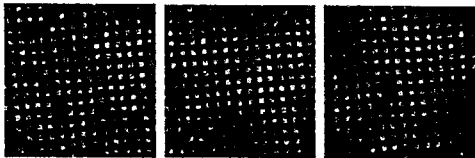
그림 6. 완성된 구조물의 SEM 사진

IV. 실험결과 및 고찰

그림 7과 그림 8은 완성된 구조물을 마이크로 스테이지와 전기 구동으로 움직였을 때, 그 영상에 다른 격자 영상을 겹쳐 얻은 moiré 무늬들이다. 그림 9는 이 겹쳐진 이미지를 이용하여, $1\mu\text{m}$ 단위(주기의 1/6)로 선형 격자가 움직였을 때, 디지털 이미지 처리를 하여 계산한 위상 변화를 보인 것이다.



(a) 움직이기 전 이미지 (b) $3\mu\text{m}$ (주기/2) 이동한 이미지
그림 7. 선형 격자에 의해 형성된 moiré 무늬



(a) 움직이기 전 (b) x방향으로 $3\mu\text{m}$ (주기/2) 이동 (c) y방향으로 $3\mu\text{m}$ (주기/2) 이동

그림 8. 십자 모양의 격자에 의해 형성된 moiré 무늬

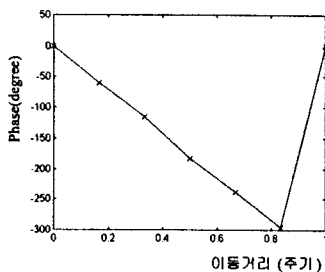


그림 9. 선형 격자의 움직임에 따른 moiré 무늬의 위상 변화

위의 형성된 moiré 무늬를 보면, 격자의 선폭비, 대조비(격자 선과 슬릿을 통한 반사율의 차이) 등이 무늬 전체의 밝기 분포,

대조비 등에 영향을 주어 측정 결과에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, moiré 무늬를 이용하는 미세 구조물을 설계할 때는 위 영향을 고려하여 격자의 선폭비, 격자의 반사율 등을 결정해야 한다. 만약 이 최적 설계 하에서 $2\mu\text{m}$ 주기 이하의 격자가 사용되고, CCD 카메라의 해상도가 2' 이하의 moiré 무늬의 위상 변화를 감지할 수 있으면, 10 nm 정도의 움직임까지 측정할 수 있게 된다. 이 사양에서는 AFM, STM 등의 미세기계 주사 현미경과 같은 초정밀 시스템 등에 사용될 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 선형 격자 및 십자 모양의 격자를 이용하여 moiré 무늬를 형성, 미세 구조물의 직선(1차원) 및 평면(2차원) 움직임을 측정하는 방법을 제시하고 있다. FFT를 이용한 간단한 이미지 처리를 통하여, moiré 무늬의 움직임으로부터 실제 변위를 계산할 수 있었다. 이 방법은 시스템 구성에 따라 10 nm 정도의 정밀한 측정을 할 수 있으므로 고정밀도 관성센서, 미세기계 주사 현미경 등에 사용될 수 있다[5].

감사의 글

본 연구에서 사용된 미세 구조물은 서울대학교 반도체공동연구소의 MEMS MPC 프로그램에 의해 제작된 것으로서 조동일 교수님께 감사드립니다. 본 연구는 과학기술처의 미래원천기술 과제에 의해 KIST로부터 지원 받은 것임.

참고 문헌

- [1] A. T. T. D. Tran, J. J. Lee, K. Zhang, and Y. H. Lo, "Ultrafine Motion Detection of Micromechanical Structures Using Optical Moiré Patterns," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 1058-1060, 1996.
- [2] G. Oster, Y. Nishijima, *Sci. Amer.*, vol. 208, p. 54, May, 1963.
- [3] A. J. Durelli, V. J. Parks, *Moire Analysis of Strain*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1970.
- [4] 이상우, 한아름, 조동일, "P-dichlorobenzene 승화 건조기를 이용한 폴리실리콘 구조물의 부착 방지," 대한전기학회 MEMS 연구회 학술발표회 논문집, pp. 131-142, 1997.
- [5] A. Tran, G. L. Christenson, A. Lopez, and Y. H. Lo, "Micromachined Micro-optic devices," *LEOS News Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 10-11, 1996.