

0.4nm 해상도의 엔코더 타입 전기용량형 변위센서

강대실[†]·김무진*·문원규**

An 0.4nm Resolution Encoder-like Capacitive Displacement Sensor

Daesil Kang, Moojin Kim and Wonkyu Moon

Key Words: Capacitive Sensor(전기용량형 센서), Contact-type(접촉식), Displacement Sensor(변위 센서), Nano Sensor(나노 센서)

Abstract

A Contact-type Linear Encoder-like Capacitive Displacement Sensor (CLECDiS) has been developed to measure displacements at high accuracy within a long measurement range. In this paper, we have worked on improving the performance and reliability of the sensor. The performance increase can be done by introducing the smaller electrode patterns of 4 μ m width. In order to improve the reliability of the sensor we have changed the electrode layers from chrome-gold to chrome-gold-chrome and re-design its supporting structure. The newly-designed sensor is fabricated and tested to show that its sensitivity is 35pF/ μ m, which implies that its resolution may be 0.36nm if SNR (Signal-to-Noise-Ratio) is 80.1dB. It is about ten times of that (3.14pF/ μ m) of its previous version with 10 μ m electrodes. The total measurement range remains the same as the previous one; 15mm. The calibration experiments show its improved performance and reliability.

1. 서론

기호설명

SNR : 신호 대 잡음 비 (Signal to Noise Ratio)
SGR : 전기용량형 센서에서 전극 평판의 폭 (width)과 전극 평판간 거리(distance)의 비 (Span to Gap Ratio)
 ϵ_0 : 진공에서의 유전율 (8.854pF/m)
 ϵ_r : 물질의 상대 유전율
A : 단일 전극의 면적
d : 평판사이의 거리
C : 전기용량

최근 여러 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있는 나노 기술은 기술 발달과 더불어 필연적으로 나노 크기의 물체를 조작하고, 측정할 수 있는 기술을 요구한다.(1)

이런 관점에서 볼 때, 변위 센서는 물체의 거리와 변위, 크기를 측정할 수 있는 측정 장치임과 동시에, 초정밀 위치제어 시스템의 반복정밀도를 보장하기 위한 피드백(Feedback)센서로 사용되므로, 나노 크기의 위치제어 및 측정 영역에서 중요한 위치에 있다. 한편, 다루어야 하는 구조물의 크기가 작아지는 것과는 별도로 생산성 향상이나 연구 영역 확대를 위해서 다룰 수 있는 영역은 넓어져야 한다. 그 예로 반도체 부품에서 부품 크기를 결정하는 게이트의 크기는 작아지지만, 이를 제조하기 위한 웨이퍼의 크기는 점점 커지는 추세이다.(2,3)

즉, 변위 센서 또는 위치제어 시스템의 해상도

† 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : das00@postech.ac.kr
TEL : (054)279-8217 FAX : (054)279-5899

* 포항공과대학교 기계공학과

** 포항공과대학교 기계공학과

와 측정영역의 비인 동적영역(dynamic range)이 커져야 할 필요가 있다. 반면, 일반적인 변위 센서의 경우 동적영역은 $10^5 \sim 10^6$ 정도로서 1nm의 해상도라면 0.1mm~1mm 영역을 측정할 수 있는 정도이다. 이에 보다 동적영역을 넓힐 수 있는 새로운 센서로서 CLECDiS(Contact-type Linear Encoder-like Capacitive Displacement Sensor, (4))라는 센서가 개발된 바 있다. 이 센서는 신호 대 잡음비 인 SNR(Signal to Noise Ratio)이 80.1dB일 때, 0.9nm의 해상도를 가지며, 10mm 이상(최대 15mm)의 영역을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 이 센서의 측정영역은 유지하면서, 동일한 SNR에서 해상도를 0.36nm로 두 배 이상 향상시킴으로서 본격적인 나노 변위 센서로 만들었다.

2. 설계 및 제작

2.1 설계

일반적으로 전기용량형 센서는 식[1]과 같은 두 개의 평행 도체 평판의 식에 기본을 두며, 구동판이 고정판에 대해 평행한 방향으로 움직임으로서 겹쳐지는 면적 A 가 변화하는 형태를 면적변화형, 고정판에 대해 법선 방향으로 움직임으로서 평판사이 간격 d 가 변화하는 형태를 공간변화형이라고 한다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \dots [1]$$

이 중 면적변화형 센서는 공간변화형 센서에 비해 측정 영역이 넓은 반면, 평판사이의 간격(gap)인 d 를 작게 하기 어렵고, 작게 만들더라도 일정한 간격으로 유지하기 어렵다는 단점이 있다. CLECDiS는 면적변화형의 장점인 넓은 측정영역은 살리고, 유전층을 접촉층으로 이용한 접촉식으로 사용함으로써 갭의 유지가 용이할 뿐 아니라 유전층의 두께를 이용해 갭을 조절하므로 작은 갭을 만들기 편리하도록 한 센서이다. 이에 덧붙여 평판에 일정한 크기의 전극이 전극폭과 동일한 간격으로 반복되도록 하여 전극폭이 작아질수록 민감도가 높아질 수 있도록 되어있다. Fig. 1은 이러한 CLECDiS의 개념을 나타낸 그림이다.

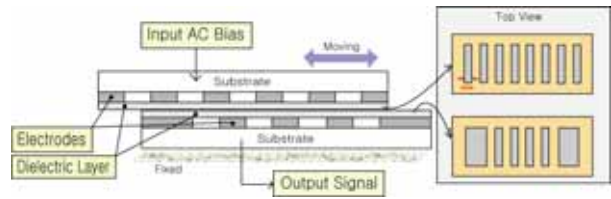


Fig. 1 Schematics of CLECDiS

즉, CLECDiS는 기본적인 면적 변화형의 반복 형태를 가지고 있으므로, 설계 인자는 단일전극의 면적과, 평판간 거리, 그리고 유전율을 지정하는 유전체가 된다. 하지만, 실제 설계시에는 전극 면적보다는 전극의 면적을 결정할 수 있는 요인이면서 반복정도를 나타내는 전극의 폭(width)이 보다 중요한 인자가 되므로, 전극폭과 평판간 거리(gap, 이하 ‘갭’)를 설계 인자로 사용하였다. 그리고 접촉식으로 사용하므로 유전체는 마찰과 마모 문제를 우선시하여 Diamond Like Carbon(DLC)을 사용하였다.(4)

2.1.1 전극의 폭 결정

센서에서 전극이 차지하는 영역의 크기가 바뀌지 않으면, 전극과 공백이 같은 크기로 반복되므로, 전체 Capacitance의 크기는 일정하다. 따라서, 전체 전극 면적이 동일하다면, 전극의 길이는 일정하게 두므로, 전극의 폭이 작아질수록 민감도가 높아진다. 이전 모델(4)의 경우 전극 폭은 $10 \mu\text{m}$ 였고, 이를 개선하기 위해서 이보다는 작은 전극 폭을 가질 필요가 있다.

한편, 마스크의 제작 해상도는 크롬마스크의 경우 최소 선폭 오차가 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ (5)이므로 전극 폭의 오차가 10%는 넘지 않도록 하려면 전극의 폭이 $4 \mu\text{m}$ 이상이 되어야 한다. 전극의 폭은 작을수록 좋고, $10 \mu\text{m}$ 크기의 전극 폭을 갖는 샘플의 다음 모델로 $4 \mu\text{m}$ 정도면 큰 무리는 없을 것으로 생각되므로 전극의 폭은 공정 오차는 무시하고, 마스크 오차만을 감안할 때 최소 선폭이라 할 수 있는 $4 \mu\text{m}$ 로 결정하였다.

2.1.2 갭(gap) 결정

식[1]에서 갭은 다른 조건과는 독립적이므로 작을수록 좋다. 하지만, 실제 전극에서는 fringe effect라고 불리는 비선형 효과 때문에 상하 전극의 겹쳐지는 면적이 0일 때, 전기용량은 0이 되지 않는다. 선행연구(6)에 따르면 CLECDiS와 같은 면적변화형 전기용량형 센서에서는 민감도

가 전극의 폭과 갭의 비(SGR, Span to Gap Ratio)에 의해 변하며, Fig. 2와 같이 SGR이 4일 때 최대값을 가지는 형태의 그래프를 그린다.

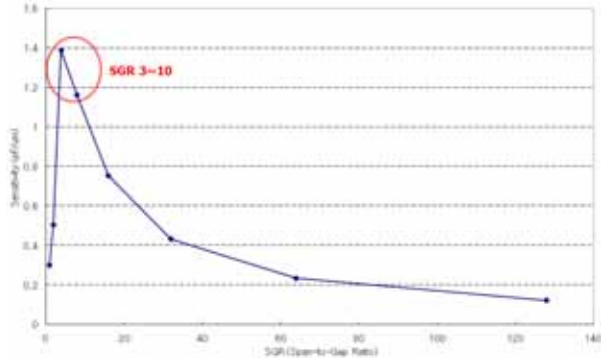


Fig. 2 Sensitivity graph of CLECDiS

앞서 전극폭은 $4\mu\text{m}$ 로 결정되었으므로, SGR이 4가 되려면 갭은 $1\mu\text{m}$ 가 되어야 한다. 하지만, 접촉면이자 유전체로 사용되는 DLC는 두께가 두꺼워지면, 잔류응력의 문제로 인해 막의 접착력이 떨어지는 문제점이 있고(7), CLECDiS는 제작시 상하판을 별도로 제작하여 접촉식으로 사용기 때문에, 제어하기 어려운 미세먼지의 끼어들 등으로 인해 $+\alpha$ 의 갭이 발생할 수 있다. 즉, SGR을 4로 그대로 사용하면 이런 문제들로 인해 민감도가 떨어지는 방향으로만 제작될 가능성이 크다. 따라서 민감도가 최대가 되는 영역인 SGR 3~10 사이에서 위의 문제를 감안해도 민감도를 유지 또는 증가시킬 수 있는 SGR 10의 값을 선택하였다. 따라서 갭은 400nm 로 결정하였다.

2.2 제작

CLECDiS 제작은 마이크로 머시닝 기법을 이용한다. 기판은 4인치 유리웨이퍼를 사용하며, 전극은 금, 유전층으로는 앞서 언급한대로 DLC를 사용한다. 하지만, 유리 기판과 금, 금과 DLC는 서로 잘 붙지 않기 때문에 중간에 접착 버퍼로 전극 양쪽에 크롬층을 추가하였다. 그리고 DLC-금 접착력보다는 낮지만, DLC-크롬 접착력도 좋은 편은 아니기 때문에 DLC와 크롬 사이에는 추가 접착 버퍼로 Silane을 넣어 최종 증착 모식도는 Fig. 3과 같이 된다.



Fig. 3 Deposition layer

크롬과 금으로 된 전극층은 유리기판에 E-beam evaporator를 이용해 크롬 10nm - 금 90nm - 크롬 20nm 를 증착한 후, RIE를 이용해 패턴을 만들었다. 그 후 PECVD(Plasma Enhanced CVD)를 이용해 Silane와 DLC를 각각 20nm, 200nm 만큼 증착하였다. 이 과정에서 Silane의 두께 40nm(상하판을 합친 두께)는 갭의 크기 결정시 고려하지 않은 추가증가분으로, 실제 갭의 크기는 총 440nm 가 된다. Fig. 4는 DLC를 증착만을 남겨둔 상태의 모습이다.

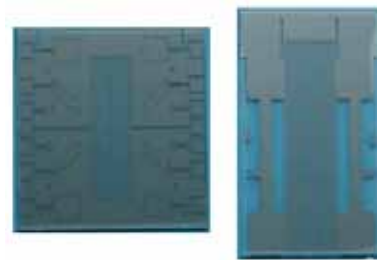


Fig. 4 Figure of CLECDiS

3. 실험 및 결과

3.1 신호 획득

먼저 제작한 샘플은 이전 CLECDiS의 성능을 향상시키기 위한 모델인 만큼 우선 신호가 제대로 나오는 것을 확인하고, 그 신호가 이전 신호에 비해 민감도가 향상되었는지를 확인해야 한다. 이를 위해서는 센서를 장착해서 변위를 생성시킬 스테이지가 필요하다.

스테이지는 상용 위치제어 시스템인 New Port사 M-562와 CMA25-CCCL(Fig. 5)를 사용하였고, 구동 제어는 New Port사의 ESP300 제어기를 사용하였다.(4)

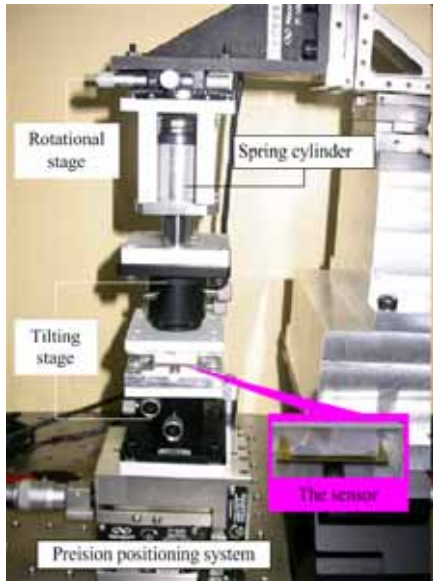


Fig. 5 The stage for CLECDiS

센서와 스테이지를 연결하기 위한 지그는 Fig. 6과 같이 실험의 편의성을 위해 중앙부 탈착이 가능하며, 외팔보를 이용해 탄성력에 의한 접촉 유지를 용이하게 하는 형태로 제작하여 사용하였다.



Fig. 6 The jig for CLECDiS

데이터는 속도를 0.005mm/s 로 지정하고, 연속적으로 구동 시킨 뒤, Agilent사의 Impedance analyzer인 4294A로 측정하였다. 바이어스 신호는 10kHz, 1V(peak to peak) 사인파이다. 측정 데이터는 Fig. 7과 같다. 그래프의 y축은 센서의 전기용량값을 나타내고, x축은 샘플링시의 포인트 순서로 가변적이긴 하지만, 20포인트에 1초 정도가 되는 시간축에 해당한다. 이전의 전극폭 10 μm 인 샘플의 경우 동일한 조건에서 민감도가 3.14pF/ μm (4) 였으나, 이번 샘플의 경우 결과 그래프를 보면 전기용량의 변화폭이 약 140pF이다. 전체 전기용량 변화폭이 그래프의 반주기이자, 전극폭의 크기와 같은 4 μm 에서 나타나는 것이므로, 민감도는 약 35pF/ μm 이 된다. 이는 이전 모델에 비해 10배이상 향상된 결과이다.

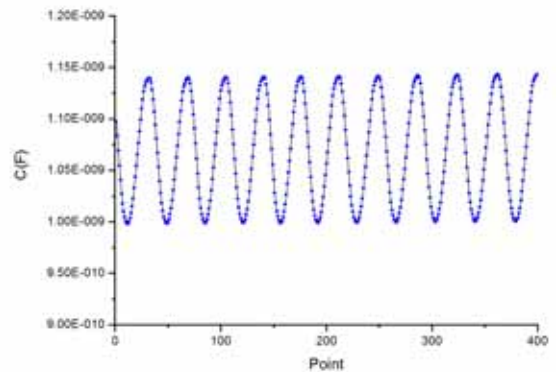


Fig. 7 A measurement data of CLECDiS with 4 μm pattern

3.2 신호 비교

CLECDiS의 신호는 전기용량의 변화를 측정하는 것이지만, 실제 센서로 사용하기 위해서는 전기용량 값을 원하는 것이 아니라 변위를 얻고자 하는 것이므로 센서 신호로부터 실제 변위를 얻을 수 있어야 한다. 따라서 변위를 측정할 수 있는 기준 센서의 신호와 비교하여, 변위와 CLECDiS 신호의 관계를 맵핑할 필요가 있다.

이를 위하여 레이저 진동계인 Polytec의 OFV511와 이를 이용하여 변위를 측정할 수 있는 Polytec의 OFV3001 컨트롤러를 이용하여 Fig. 8과 같이 측정용 벤치를 구성하였다.

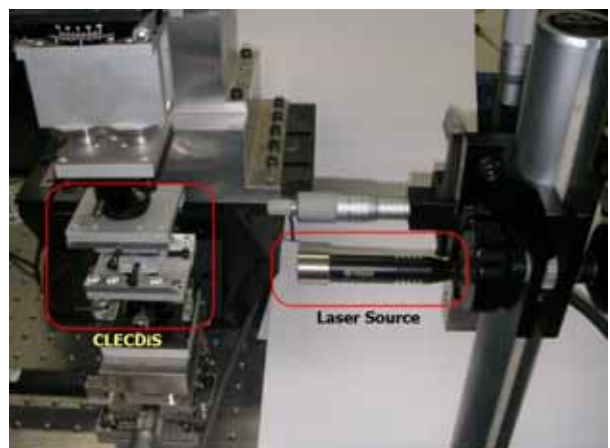


Fig. 8 A setting of calibration with laser vibrometer

측정 시 레이저 부분은 CLECDiS의 구동판에 맞추고, 민감도를 320 $\mu\text{m}/\text{V}$ 로 둔 상태에서 수행하였다. CLECDiS 부분은 전기용량을 전압으로 바꾸어 주는 간단한 회로를 제작하여 NI PXI

4472 데이터 획득 보드의 2개의 채널을 이용하여 레이저 데이터와 동시에 수집하였다. 전기용량-전압 변환 회로의 칩 구동 바이어스는 $\pm 10V$, 신호 바이어스는 $10V(\text{peak to peak})$, $1kHz$ 사인파를 사용하였다.

이 두 데이터에서 레이저의 변위 신호를 x축, 센서의 전압신호를 y축으로 하여 x-y 그래프를 그린 그래프가 Fig. 9이다.

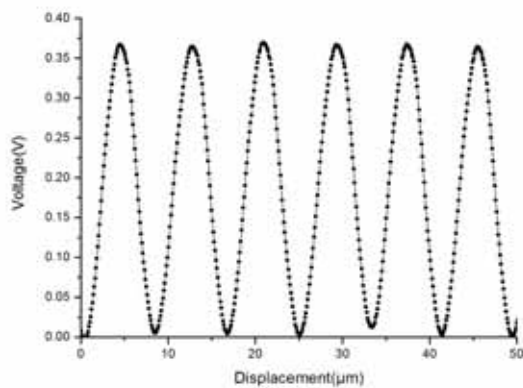


Fig. 9 x-y graph of displacement and voltage signal of CLECDiS.

최종 데이터를 통해 신호 변화가 변위에 대응해 연속구동에서 시간축으로 측정된 모양과 거의 동일함을 알 수 있다. 또, 이를 통해 센서의 변위, 전압 관계를 얻을 수 있다.

4. 결론

10mm 이상의 측정영역에 대해 $0.9nm$ 의 해상도 (SNR이 $80.1dB$ 일 때)를 가지던 이전 모델의 CLECDiS를 개량하여 동일한 측정영역에 대해 $0.36nm$ (SNR이 $80.1dB$ 일 때)를 가지는 대변위 고 해상도 변위센서를 설계하고 제작하였다. 신호의 민감도는 10배이상 향상되었으며, 기준센서와의 신호 비교를 통해 변위와 센서 신호의 관계도 확인하였다. 이 뿐 아니라 정량화 하기는 어렵지만, 센서의 신호 안정성도 향상되었다.

아직, 샘플마다 보정을 따로 해줘야 하는 것이나, 전압과 변위의 관계를 수식화하기 어려워서 포인트 매핑을 해야한다는 점 등 해결해야할 부분이 많이 남았지만, 센서의 전체적인 성능을 향상시켰고, 실질적인 나노센서 영역에 진입하였다

는 점에서 의의가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 나노핵심기반기술개발사업과 과학기술부/한국과학재단 자기조립소재공정우수연구센터육성사업(R11-2005-048-00000-0)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- (1) Mark L. Schattenburg, 2003, "Nanometrology in Nanomanufacturing," *NASA Tech Briefs*, Nanotech 2003 Conference
- (2) International SEMATECH, 2005, International Technology Roadmap for Semiconductors 2005 Edition Executive Summary, ITRS
- (3) Paolo Gargini, 2004, "Sailing with the ITRS Into Nanotechnology," ITRS
- (4) Moojin Kim, Wonkyu Moon, Euisung Yoon, Kwang-Ryeol Lee, 2006, "A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range," *Sensors and Actuators A*, Vol. 130-131, pp. 135~141
- (5) <http://www.microimage.co.kr/product/chrome.html>
- (6) Moojin Kim, 2006, "A New Encoder-like Capacitive Position Sensor with Enhanced Performance," A Doctorial Dissertation of POSTECH, pp. 30~52
- (7) Kwang-Reyol Lee, Kwang Yong Eun, 1993, "Diamond-like Carbon Film," *Bull. of the Korean Inst. of Met. & Mater.*, Vol. 6, No. 4, pp. 345~361