

# 알루미나 코팅이 정전기적 구동의 마이크로 소자의 풀 인 전압에 미치는 영향

박현식\*

<sup>1</sup>한경대학교 전기전자제어공학과, 미래융합기술대학원, IT융합기술연구소

## Effect of alumina coating on the Pull-in Voltage in Electrostatically actuated micro device

Hyun-Sik Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Graduate School of Future Convergence Technology, Institute for information technology convergence, Hankyong National University

**요 약** 정전기적으로 구동되는 마이크로 소자는 센서 및 액츄에이터 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 정전기적으로 구동되는 마이크로 소자 구조체는 수 마이크로미터 이하의 전극 사이 간격으로서 정전기적인 부착 현상에 의한 고장이 발생 한다. 본 연구에서는 마이크로 소자의 부착 현상을 개선하기위하여 전극의 길이와 면적을 달리한 마이크로 소자의 구조체를 제작 하고, 원자 층 증착방법에 의한 알루미나 코팅 전과 후의 마이크로 소자의 풀인 전압(pull-in voltage)을 측정 비교 분석 하였다. 마이크로 소자의 상부 전극 길이 변화에서는 알루미나 코팅 후에 풀인 전압의 상승이 관찰되었고 전극면적이 클수록 풀인 전압 상승이 관찰되었다. 정전기적으로 구동되는 마이크로 소자의 부착 현상을 개선하기위한 방안으로 본 연구에서 적용된 알루미나 코팅 방법은 효과적인 방법이다.

**Abstract** Electrostatically-actuated Micro device have been used widely in a variety of integrated sensors and actuators. Electrostatically-actuated micro devices with a gap of several micrometers or less between the electrodes have shown failure problems by electrostatic adhesion. To improve this adhesion phenomenon, micro devices of varying lengths and widths in electrodes were fabricated, and an alumina coating was then deposited using atomic layer deposition technology. The effects of improving adhesion phenomenon were compared by measuring the pull-in voltage before and after the coating process. The pull-in voltage increased with increasing length of the upper electrode after the coating. An increase in the electrode area results in an increase in the pull-in voltage after coating. The alumina coating method applied to improve the adhesion on an electrostatically-actuated micro device was observed as an effective method.

**Key Words** : Adhesion, Alumina, Coating, Micro deice, Pull-in voltage

### 1. 서론

산업용으로 마이크로 소자는 집적화된 센서 및 액츄에이터(actuator) 분야에 널리 사용되고 있다[1-3]. 마이크로 소자 구조체의 전극사이 간격은 수 마이크로미터

이하로서, 정전기적으로 구동하는 경우 정전기적인 부착 현상[4-8]에 의한 고장이 발생 한다. 정전기적인 부착 현상은 상부 전극이 하부 전극사이에 인가되는 전압이 일정 값을 초과하면 상부전극이 하부 전극과 부착되어 원래 상태로 복원되지 않는 현상이다. 이와 같은 부착현상

\*Corresponding Author : Hyun-Sik Park(Hankyong National Univ.)

Tel: +82-10-2459-5193 email: hspark@hknu.ac.kr

Received May 27, 2014

Revised (1st July 31, 2014, 2nd August 26, 2014)

Accepted September 11, 2014

은 마이크로 소자의 동작 전압 범위의 제한과 더불어 고장 발생의 문제점을 발생시킴으로 부착 현상을 개선하기 위하여 다양한 연구가 시도되고 있다[9].

본 연구에서는 정전기적으로 구동하는 마이크로 소자 구조체의 부착 현상을 개선하기 위한 원자 층 증착 (atomic layer deposition) 방법[10,11]에 의한 알루미늄 코팅 방법을 적용하여 부착 현상의 개선 효과를 검토하였다.

원자층 증착 방법은 반응물의 화학흡착, 불활성가스로 과잉 반응물 제거, 분리되어 주입된 반응물 화학흡착, 불활성 가스로 과잉 반응물 제거의 과정의 화학 반응 사이클로 박막을 형성하여 두께 제어의 용이성과 우수한 단차 피복성 (step coverage)의 우수성을 갖고 있어 본 연구와 같이 구조체의 형상의 높이 차이가 있는 시료의 경우에도 균일한 두께의 박막을 증착할 수 있다. 이와 같은 원자 층 증착 방법이 단차 피복성의 우수성은 원자 층 증착 방법의 실험결과[3]에서 보고되어 있다.

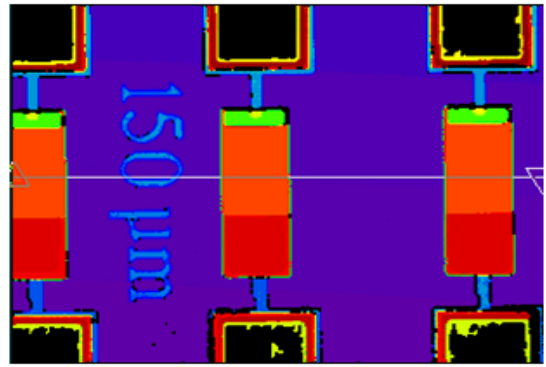
정전기적으로 구동되는 마이크로 소자의 부착 현상은 풀인 전압을 이용하여 일반적으로 측정된다[12-13].본 연구에서는 제작된 구조체에 원자 층 증착 방법을 적용한 알루미늄 코팅 전과 후의 부착 현상을 관찰하기 위하여 풀인 전압 ( pull-in voltage)을 측정하여 비교 분석하였다.

## 2. 본론

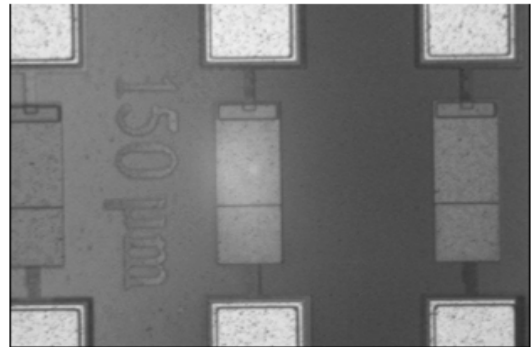
### 2.1 마이크로 소자 구조체 제작

본 연구에서의 마이크로 소자 구조체는 MEMS (micro electro mechanical system) 공정으로 널리 알려져 있는 MUMPs(Multi-User MEMS Processes) 공정 [14-15]을 이용하여 Fig.1과 같은 캔틸레버 빔(cantilever beam) 형상의 구조체를 제작하였다.

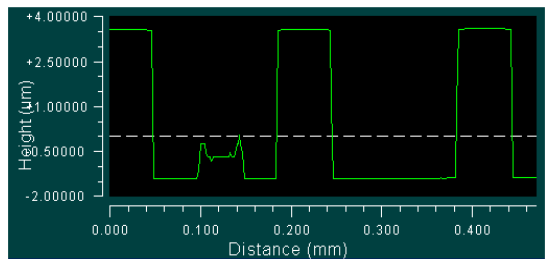
상부 전극과 하부 전극의 간격은 불산(HF) 처리로 산화물 희생층(sacrificial layer)을 제거하였고 상부 전극과 하부전극 사이거리는  $2.0\mu\text{m}$  로 설정하였다. 구조체의 상면 전극은 폴리실리콘(poly silicon)으로 제작된 캔틸레버 빔 형상으로서 길이 150, 200, 250, 300,  $350\mu\text{m}$  및 폭  $60\mu\text{m}$  로 제작하였고 또한 각각의 빔 길이에 따라서 폭  $60\mu\text{m}$ 의 하부전극 길이를 달리하여 전극면적을 변수로 설계 제작하였다.



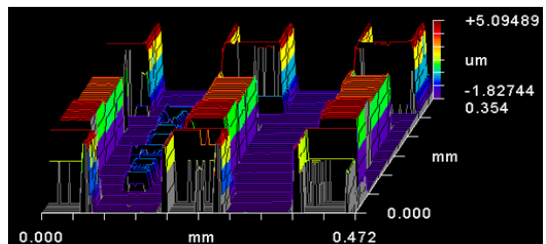
(a)



(b)



(c)



(d)

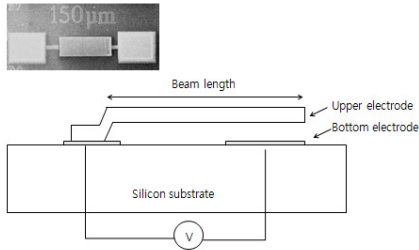
[Fig. 1] Fabricated micro device structure by interferometric measurements. (a) Photograph of pattern images, (b) Photograph of pattern with position, (c) Measured the dimensions (d) Measured 3D images of samples in this study.

Fig. 1은 본 연구에서 제작된 상부전극 길이  $150\mu\text{m}$ 의 시료의 길이 시료의 측정 결과로서 전극의 폭은  $60\mu\text{m}$ 이고, 상부 전극은 두께  $2.0\mu\text{m}$ 이며, 하부 전극 사이 간격은  $2.0\mu\text{m}$ 으로 제작되었다.

## 2.2 풀인 전압 측정

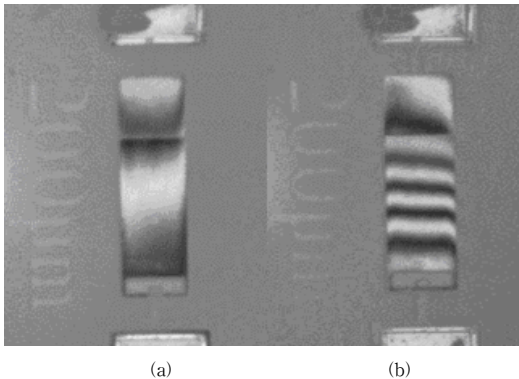
### 2.2.1 풀인 전압 측정 방법

풀인 전압은 마이크로 구조체의 일정간격을 유지하고 있는 상부와 하부 전극 사이에 전압을 인가하여 상부 전극의 굽힘 현상을 유발할 때의 전압이다[12,13]. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 마이크로 소자 구조체의 하부전극과 상부 전극 사이의 직류 전압을 인가하는 측정 시스템을 이용하여 정전기적 부착현상과 풀인 전압 측정을 하였다.



[Fig. 2] Schematic diagram of measuring method of pull-in voltage.

인가전압에 따른 상부 전극의 굽힘 현상은 광학 테이블 위에서 광학 간섭(interferometric) 방법을 이용하여 Fig. 3과 같이 관찰하였다. 이때 상부 전극의 굽힘이 하부 전극과 부착하는 순간의 전압을 풀인 전압 (pull-in voltage)으로 설정하였다.

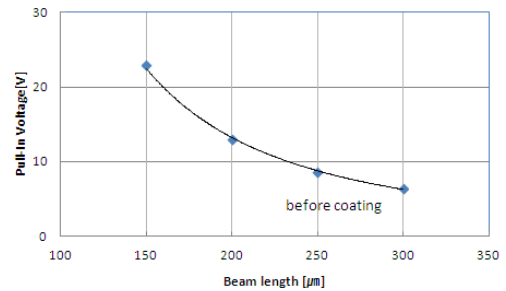


[Fig. 3] Interference microscope images for measuring pull-in voltage of samples in this study. (a) before adhesion and (b) after adhesion.

제작된 구조체에 대하여 알루미늄 층의 증착 전과 후를 비교하여 풀인 전압을 측정 비교 하였다. 본 연구에서 적용된 알루미늄 층의 증착 방법은 고순도 TMA (Trimethylaluminium),  $\text{H}_2\text{O}$  및 캐리어 질소가스를  $450\text{K}$ 으로 유지되는 반응로에 반응 사이클에 따라 주입하면서 원자 층 증착 방법에 의한 알루미늄 층을 성장 시켰다. 본 연구에서의 반응 사이클에 따른 박막 증착 속도는 증착 사이클 당  $1.28 \text{ \AA}$ 로 유지하였다.

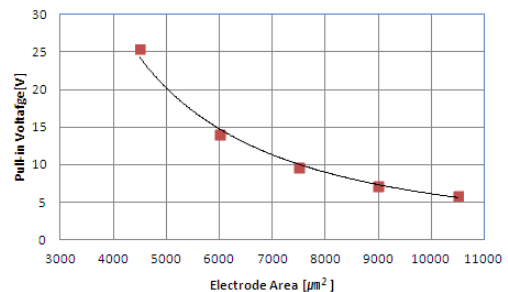
### 2.2.2 제작된 구조체의 풀인 전압 측정 결과

제작된 구조체의 빔 길이와 전극면적에 따른 알루미늄 층 코팅 전의 풀인 전압을 측정된 결과는 다음과 같다. Fig. 4는 제작된 구조체의 빔 길이에 따른 풀인 전압을 측정된 결과로서 상부전극의 길이가 길어질수록 풀인 전압은 평균  $22.87, 12.92, 8.64, 6.38\text{V}$ 로 낮아지는 현상이 관찰되었다.



[Fig. 4] Variation of pull-in voltages of micro device with beam length.

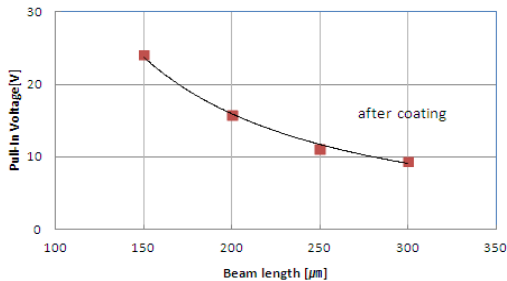
Fig. 5는 하부전극의 폭은 일정한 상태에서 하부 전극의 길이를 변화하여 전극면적을  $9,000, 12,000, 15,000$  및  $18,000\mu\text{m}^2$ 으로 제작하여 전극면적에 따른 풀인 전압을 비교 측정된 결과로서 전극면적이 커질수록  $25.42, 14.11, 9.71, 7.24, 5.87\text{V}$ 로 낮아지는 현상이 관찰되었다.



[Fig. 5] Variation of pull-in voltages of micro device with electrode area.

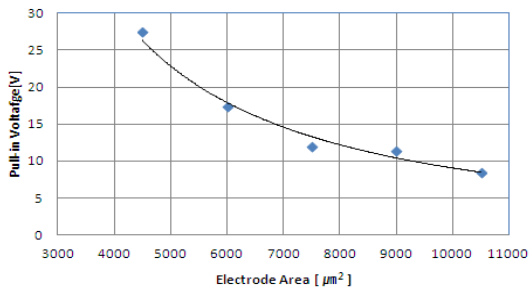
### 2.2.3 알루미늄 코팅 후의 풀인 전압 측정 결과

제작된 마이크로 소자 구조체에 알루미늄 층을 두께 115nm로 코팅한 이후에 풀인 전압을 측정한 결과는 다음과 같다. Fig.6은 제작된 구조체에 알루미늄 층을 코팅한 후 구조체의 상부전극 길이에 따른 풀인 전압을 측정한 결과로서 상부전극의 길이가 길어질수록 풀인 전압은 평균 24.12, 15.88, 11.12, 9.45V로 낮아지는 현상이 관찰되었다.



[Fig. 6] Variation of pull-in voltages of micro device with beam length after coating.

Fig. 7은 제작된 구조체에 알루미늄 층을 115nm의 두께로 코팅한 후에 하부전극의 폭은 일정한 상태에서 하부 전극의 길이를 변화하여 전극면적을 9,000, 12,000, 15,000 및 18,000 $\mu\text{m}^2$ 으로 제작하여 전극면적에 따른 풀인 전압을 측정한 결과로서 전극면적이 커질수록 풀인 전압은 27.44, 17.42, 12.02, 11.45, 8.41V로 낮아졌다.



[Fig. 7] Variation of pull-in voltages of micro device with electrode area after coating.

## 3. 검토

본 연구에서 제작된 마이크로 소자 구조체의 풀인 전압은 상부전극의 길이가 길어질수록, 전극 면적이 커질수록 낮아지는 결과가 얻어졌다. 원자층 증착 방법에 의한 알루미늄 층을 코팅한 후에는 상부전극의 길이 증가

에 따른 결과와 전극면적 증가에 따른 결과 모두 코팅 전에 비하여 풀인 전압이 증가하는 것으로 관찰되었다.

풀인 전압은 단면적과 유전상수에 반비례하고 탄성계수와 전극간의 간격에 비례 하는 것으로 알려져 있다[17].

본 연구에서 측정한 결과에서도 전극면적에 반비례하고 길이에 반비례함이 관찰되었다. 또한 알루미늄 층 코팅 후에는 알루미늄 코팅 전에 비하여 알루미늄 코팅 층의 영향으로 상부전극 길이를 달리했을 때와 전극면적을 달리 했을 때 모두 코팅 전에 비하여 코팅 후에 풀인 전압의 증가 현상이 관찰되었다. 상부 전극 길이 변화에 따른 측정결과에서는 알루미늄 층 코팅 전에 비하여 알루미늄 코팅 후에 풀인 전압의 증가는 평균 2.45V로서 평균 30.23% 정도의 풀인 전압 상승효과를 나타냈다. 구조체의 전극면적 변화에 따른 측정결과에서는 알루미늄 코팅 전에 비하여 알루미늄 코팅 후에 풀인 전압의 증가는 평균 2.88V로서 평균 31.32% 정도의 풀인 전압 상승효과를 나타냈다.

이들 결과는 보고된 풀인 전압 해석 결과[17]와 유사한 결과로서 본 연구에서 적용된 MUMPs 공정에서의 알루미늄 층의 탄성계수를 153GPa로 설정하고 있는바, 보고[17]된 풀인 전압의 파라미터인 자유공간의 유전율, 전극간의 간격, 마주보는 전극 면적의 값은 일정한 값으로 하고 알루미늄 코팅전의 탄성 계수 값 153GPa로부터 알루미늄 코팅후의 탄성계수 값을 추정한 결과 상부 전극 길이 200 $\mu\text{m}$ 에서 약 231GPa로 탄성계수가 증가함을 확인하였다. 따라서 알루미늄 코팅으로 탄성 계수가 증가하였고 이는 풀인 전압의 상승으로 측정되었으며 알루미늄 층의 코팅이 마이크로 소자 구조체의 부착현상을 개선한 것으로 기대된다.

## 4. 결론

정전기적으로 구동되는 마이크로 소자의 부착 현상을 개선하기위하여 상부전극 길이와 전극의 단면적을 달리한 마이크로 소자의 구조체를 제작하고 원자 층 증착방법에 의한 두께 115nm의 알루미늄 박막 코팅 전과 후의 마이크로 소자의 풀인 전압을 측정 비교하였다. 마이크로 소자 구조체의 상부 전극 길이와 전극 면적을 달리한 측정결과에서 알루미늄 코팅 후가 코팅 전에 비하여 풀인 전압이 상승하는 것으로 측정되었다. 알루미늄 코팅전의 탄성 계수 값 153GPa에 비하여 알루미늄 코팅후의

탄성계수 값이 약 231Gpa로 상승하는 것으로 측정되었다. 따라서 알루미늄 코팅에 의한 풀인 전압의 상승은 탄성계수 상승에 기인하는 것으로 판단되며 이는 정전기적으로 구동되는 마이크로 소자의 부착현상을 개선하는데 알루미늄 코팅 방법이 유효한 것으로 기대된다.

## References

- [1] Jeffry J. Sniegowski, "Multi level polysilicon surface micromachining technology applications and issues", ASME 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 17-22, Atlanta, GA, pp.1-10, 1996.
- [2] C.L.Goldsmith, S. Eshelman, "Performance of low loss RF MEMS capacitive switches", IEEE microwave and guided wave letters, vol 8, no8, pp.269-271,1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/75.704410>
- [3] Brian McCarthy, George G. Adams, Nicol E. McGruer, "A dynamic Model, including contact bounce, of an electrostatically actuated microswitch", J. of microelectromechanical systems, Vol.11, No.3, pp 276-283,2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2002.1007406>
- [4] Ndreas Kaiser, "The potential of MEMS components for re configurable RF interfaces in mobile communication terminals", Solid-State Circuits Conference, 2001. ESSCIRC 2001. Proceedings of the 27th European,18-20 Sept. pp.25-28,2001.
- [5] C.H. Mastrangelo, "Adhesion related failure mechanism in microelectromechanical systems," trib.lett., vol.3, pp.223-238, 1997.
- [6] Roya Maboudian, Roger T. Howe, "Critical review : adhesion in surface micromechanical structures", J. Vac.Sci. Technol. B15(1) pp.1-19,1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/1.589247>
- [7] M.P.de Boer, T.A. Michalske, "Accurate method for determining adhesion of cantilever beam", Journal of applied physics, 86, 2, pp.817-827,1999.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.370809>
- [8] W.M.van Spengen, R. Puers and I de Wolf, "A physical model to predict stiction in MEMS", J. Micromech. Microeng, 12 pp.702-713,2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/12/5/329>
- [9] W. R. Ashurst, C.Yau, C.Carraro, R. Maboudian and M.T.Dugger, "Dichlorodimethylsilane as an Anti stiction monolayer for mems", Journal of microelectromechanical systems, vol.10,no.1, pp.41-49,2001.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/84.911090>
- [10] K.Kukli, "Atomic layer deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based on annolayered dielectrics", Journal of Non-crystalline Solids,303, pp.35-39,2002.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)00961-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(02)00961-4)
- [11] S.J.Yun, "Dependence of atomic layer-deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films characteristics on growth temperature and Al precursors of Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> and AlCl<sub>3</sub>", J.Vac.Sci.. Tech.A 15,(6) pp.2993-2997,1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/1.580895>
- [12] J.B.Muldavin, G.M.Rebeiz, "30GHz tuned mems switches", 1999 IEEE MTT-S digest TH2B-2 pp.1511- 1514,1999.
- [13] P.M.Osterberg and S. D. Senturia, "A test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures, Journal of microelectromechanical systems", vol 6, no 2, pp.107-118, 1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/84.585788>
- [14] J.M.Bustillo,R.T.Howe and R.S.Muller, "Surface micromachining for microelectromechanical systems", proceedings of the IEEE,vol 86, No. 8, pp.1552-1574,1998.
- [15] S lucas, K Kis-Sion, J Pinel and O Bonnaud, "Polysilicon cantilever beam using surface micromachining technology for application in microswitches",J. Micromech.Microeng., 7,pp. 159-161,1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/7/3/021>
- [16] Sazzadur Chowdhury, M.Ahmedi, W.C.Miller, "A comparison of pull-in voltage calculation methods for MEMS-based electrostatic actuator design", 1st international conference on sensing technology, pp. 112-117, Nov.2005.
- [17] Yuh-chung Hu, "Closed form solutions for the pull-in voltage of micro curled beams subjected to electrostatic loads", J. Micromech.Microeng.,16 pp.648-655, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/16/3/021>

## 박 현 식(Hyun-Sik Park)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공과대학 (공학박사)
- 1996년 8월 : 전자부품연구원 부품 개발팀장
- 1996년 9월 ~ 현재 : 한경대학교 교수

<관심분야>  
반도체, 전자부품