

폴리머/금속 다층구조의 기계적 특성의 실시간 측정방법

김용준

연세대학교 기계전자공학부

Abstract

폴리머 박막은 반도체 패키징, MEMS 구조물은 물론 MCM-D 등의 기술에도 널리 쓰이고 있다. 또한 대부분 폴리머/금속의 다층구조의 형태를 띠고 있어 이 상태의 기계적 특성의 이해는 더욱 중요하다. 본 연구에서는 폴리머 박막의 기계적 특성을 측정하기 위한 새로운 방법이 제안된다. 제안된 방법은 최근 발달된 마이크로머시닝기술을 사용하여 구현된 공진형 스트링구조를 이용하게된다. 폴리머 기계적 특성치와 스트링의 공진특성은 서로 상관관계를 갖게되며 이러한 공진특성의 측정은 기계적 특성의 실시간 관찰을 가능하게 해준다. 본 논문에서는 공진형 스트링을 이용하여 폴리이미드의 잔류응력과 폴리이미드/금속간의 접착 내구성을 정량화하는 방법을 제안한다. 제안된 측정방법은 단순히 스트링구조 뿐만 아니라 다른 기계적 구조에도 응용이 가능하다.

1. Introduction

전통적으로 여러 가지의 폴리머들이 반도체 혹은 전자제품의 패키징이나 회로 기판의 주재료로 널리 사용되고있다. 또한 MEMS와 MCM등으로 그 응용분야를 넓혀가고 있는 것이 사실이다. 이에 따라 여러 가지 폴리머 박막의 기계적 특성은 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 예를 들어 박막의 가장 중요한 기계적 특성들 중의 하나인 잔류응력의 경우를 생각할 수 있다[1-3]. 이 잔류응력은 박막의 벙클링(buckling) 또는 모재의 굽힘(bending)등의 원인이 되며, 이는 차후의 공정을 어렵게 만들거나 제조된 장치들의 작동시 결함을 일으킬 수 있다. 따라서, 박막을 선정할 때는 다양한 환경 하에서 사용될 박막의 잔류응력에 대한 고찰이 선행되어야 한다. 특히, 박막의 기계적 처짐은 잔류응력에 의해서 크게 영향을 받으므로 박막을 구동부분으로 설계해야 하는 다양한 MEMS에서는 이에 대한 고찰이 더욱 중요시된다[4]. 그러나, 이러한 박막의 특성은 증착조건과 공정 조건 등에 상당한 영향을 받기 때문에 단순화 혹은 표준화시키기에는 많은 애로점을 가지고 있다. 따라서, 박막의 기계적 특성을 측정하기 위한 여러 가지 측정 방법들이 제안되어 왔다[5,6]. 보편적으로 폴리이미드박막의 인장응력을 측정하기 위해서 두가지의 측정 방법이 넓게 사용되어져 왔다. 박막의 잔류응력에의한 기판의 굽힘곡률을 측정하거나[2,7] 외부 공기압의 함수로써 작용되어지는 멤브레인(membrane)의 처짐정도를 측정함으로써 박막의 여러 가지 기계적 특성들을 측정할 수 있는 방법이 그것이다[3].

박막의 기계적 특성들을 측정하기 위하여 공진 구조물들은 사용한 예가 있다[8]. 공진 구조물들을 사용한 측정방법은 이전에 사용된 방법들에 비해서 다음과 같은 여러 가지 장점들을 가지고 있다. 첫째로, 좋은 감도를 가지고 있다(공진주파수의 매우 작은 변위에 대해서도 쉽게 측정할수 있다). 둘째로, 측정과정의 검사가 용이하다. 셋째로, 측정장비의 설치가 상대적으로 간단하다. 넷째로, 수명과 피로해석이 매우 간단하다. 그러므로, 폴리머박막의 기계적 특성의 측정에 대하여 공진방법을 사용하는 것은 매우 합리적인 선택이라 할 수 있다.

본 연구에서는 가장 간단한 기계적 구조인 스트링의 공진을 이용하여 폴리이미드박막의 잔류 응력 및 폴리이미드박막과 금속박막사이의 접착내구성을 측정하는 방법을 제안하고자 한다. 그림1은 일반적인 Bulk micromachining기술을 이용하여 구현된 스트링구조이다. 이 스트링은 폴리이미드로 이루어져있으며 가칭주파수 대역의 음압에 진동하도록 설계되어있다. Rayleigh의 관계식에 의해 박막의 응력과 공진주파수의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$f_r = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

이와 같이 스트링의 공진주파수를 측정함으로써 폴리이미드의 응력을 측정할 수 있다.

대부분의 응용에서 폴리머필름들은 금속층과의 경계면을 가진다. 이 경우 금속층과 폴리머층의 접착강도를 정성적으로 결정하는 방법은 몇 가지 존재하고 있으나 정량적 측정은 여러 가지로 어려움을 겪는 것이 사실이다. 본 연구에서는 기계적 공진구조의 스트링을 이용하여 폴리머/금속의 경계면의 접착 내구성을 정량화하는 방법을 제안한다. 폴리머/금속의 접착이 완전하다면 기계적으로 하나의 물질로 이루어진 스트링으로서의 공진 형태를 가질 것이다. 하지만 폴리머/금속의 접착이 나빠진다면 두층사이에 새로운 계층(예를 들면 경계면에서 생기는 미세 공기층)이 생길 것이고, 이 계층은 전체 진동에너지의 일부분을 흡수하는 댐핑의 효과를 나타낼 것이다. 만일 주어진 폴리머/금속 스트링의 진동 시간과 변해진 공진 요소를 연계시킨다면, 기계적 움직임에 의해 생기는 접착 강도의 변화를 수치화 할 수 있다는 것이 본 제안의 기본개념이다 (그림 3).

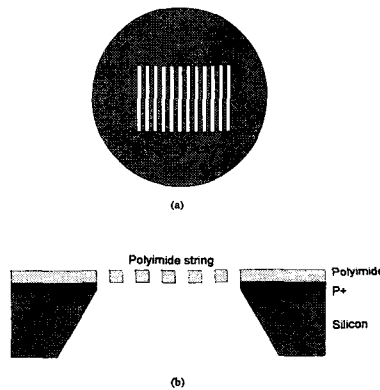


그림 1. Bulk micromachined polyimide string

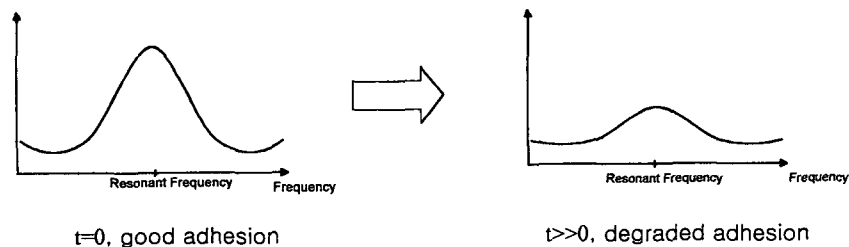


그림 2. 개념도: 접착 강도의 열화에 따른 공진 요소의 변화

2. Experiment

그림3은 Bulk micromachining에 의해 구현된 폴리이미드 스트링의 사진이다. 그림4는 스트링의 공진주파수를 측정하기 위한 개략도이다. 스피커에서 출력되는 단파장의 음파는 스트링의 진동을 일으키게 된다. 음파의 주파수가 스트링의 공진주파수와 일치할 경우 스트링의 기계적 변형은 최대치가 되고, 다시 말하면 음파로 대변되는 에너지의 소모가 가장 많아진다. 따라서 진동에 소모되고 남은 에너지가 마이크로폰에 전달되게 된다. 마이크로폰의 응답의 최소치를 찾았다면 그 주파수가 스트링의 기계적 공진주파수가 되는 것이다. 그림5는 마이크로폰의 출력값의 그래프이다. 약 15.2kHz에서 출력값이 최소가 됨을 볼 수 있다.

그림6은 Surface micromachining 기술을 이용하여 구현된 폴리머/금속 스트링 구조이다. 이 스트링은 기본적으로 캐패시터 구조로서 상하전극에 가해지는 교류 전압에 의해 진동되는 구조를 가지고 있다. 스트링이 가장 많은 변형 (deflection)을 가지는 시점(공진주파수) 주위로 일정한 공진 형태를 띄게 된다. 이와 같은 기계적 변형의 정도는 캐피시턴스를 실시간 측정함으로써 모니터링 할 수 있다. 그림7은 스트링의 캐패시턴스와 같은 값의 고정 캐패시터의 차를 이용하여 기계적 운동에 의한 캐패시턴스의 변화를 측정하는 시스템이다.

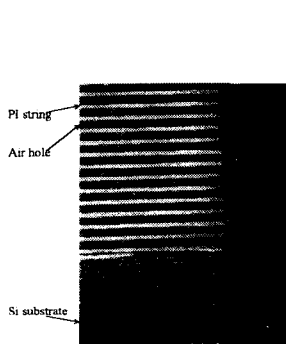


그림 3. 실리콘위에 구현된 폴리이미드 스트링 구조

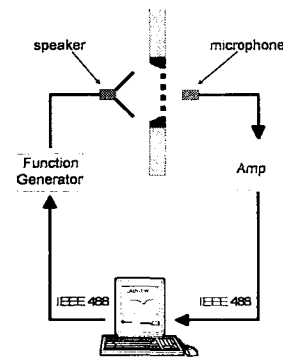


그림 4. 공진주파수 측정 시스템

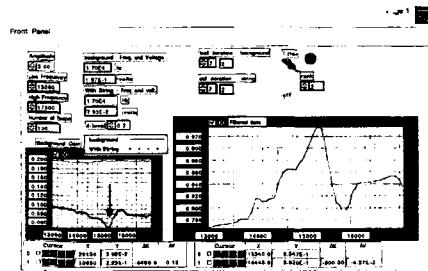


그림 5. 실제 측정시스템의 출력 그래프

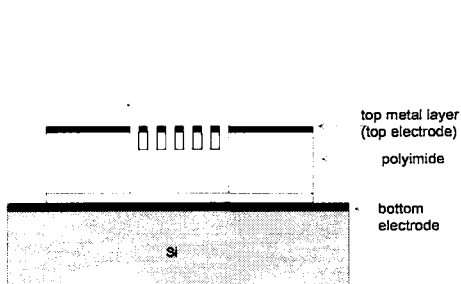


그림 6. Surface micromachining 기술로 구현된 폴리머/금속 스트링.

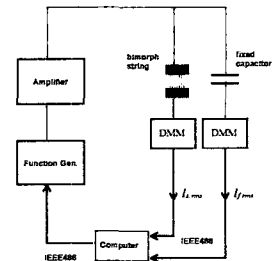
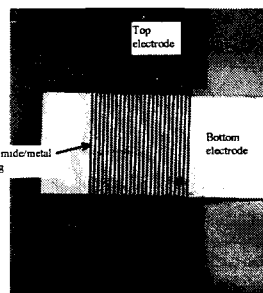


그림 7. 접착강도 측정 시스템

3. Results

잔류응력 측정의 경우 Dupont사의 PI-2555 폴리이미드 스트링으로서, 두께는 $3\mu\text{m}$, 폭은 $30\mu\text{m}$, 길이는 5.6 mm이다. 이때 측정된 공진주파수는 15.2kHz이고 이는 약 40.6 MPa 이었다. 이 결

과는 기존의 데이터들과 상당히 가까운 값을 나타내었다. 같은 방법으로 Dupont PI-2666의 잔류응력을 측정된 결과 약 4.7 MPa의 값을 얻을 수 있었다. 측정결과는 박막응력에 의한 기판굽힘을 측정하는 다른 응력 측정방법과 비교되었다. 가장 많이 사용되는 측정시스템(Flexus)이 폴리이미드박막의 잔류응력을 측정하기 위하여 사용되었으며, PI-2555와 PI-2611의 잔류응력은 각각 40Mpa와 4.6Mpa로 나타났다. 이 측정결과는 보편적인 측정장비에 의한 측정결과와 매우 일치되는 결과를 보여줬다. 또한 10^{10} 회의 진동 후에도 특별한 공진 형태의 변화를 발견하지 못했으므로 알려진바와 같이 폴리이미드의 경우 상당한 기계적 내구성을 가짐을 알 수 있었다.

제작된 Gold/PI-2611 스트링의 공진형태는 공정직후, 공진주파수로 8시간, 16시간 진동후 각각 모니터링 되었다. 그림8은 폴리머/금속 스트링의 공진형태의 변화를 나타낸 그래프이다. 기계적 진동의 시간이 지날수록 공진형태의 변화, 특히 Q-factor의 변화를 관찰 할 수 있었다. 그림9와 10은 각각 Q-factor와 공진주파수의 변화를 정리한 그래프이다. 약 16시간 (약 10^8 진동 cycles)의 진동 후부터 눈에 띄는 공진형태의 변화가 있었다.

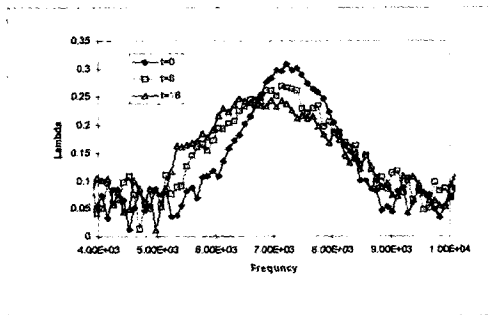


그림 8. 폴리머/금속 스트링의 공정직후, 8시간, 16 시간의 진동후 공진형태의 변화

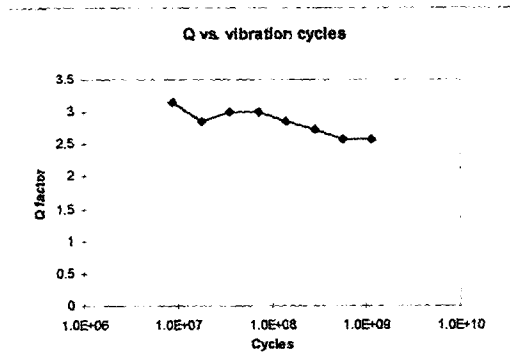


그림 9. Q-factor의 변화

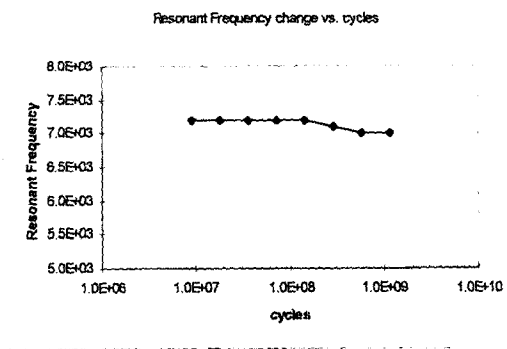


그림 10. 공진주파수의 변화

4. Discussion

폴리이미드박막의 잔류응력과 폴리머/금속 다층막의 접착특성을 정량화하는 방법이 새롭게 제안되었다. Bulk micromachining기술로 구현된 폴리이미드 스트링의 잔류응력이 측정되었으며, 결과는 다른 방식의 박막측정 장비의 결과와 비교되었다.

또한, 폴리이미드박막과 금속박막 사이의 접착 강도를 정량화할 수 있는 새로운 방법이 제안되고 구현되었다. Surface micromachining 기술에 의해 구현된 폴리머/금속 (PI-2611/Gold) 스트

링의 공진특성과 접착 강도의 변화를 연계시켜 정량화 할 수 있었으며, 재생 가능한 측정결과를 얻을 수 있었다. 상온에서 10^6 회의 진동 이후에 Q-factor와 공진주파수가 현저하게 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 비록 가장 단순한 기계적 구조라는 이유로 스트링구조가 본 연구에 사용되었지만, 제안된 방법은 외팔보나 멤브레인과 같은 다른 기계적 구조물 등에도 응용될 수 있을 것이다. 또한 기계적 특성의 변화를 실시간으로 모니터링할 수 있는 가능성을 열고 있다.

References

- [1] Stephen D. Senturia, "Can we design microbotic devices without knowing the mechanical properties of materials?", Proc. IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop, p.3/1-5, Nov. 1987
- [2] William D. Nix, "Mechanical Properties of Thin Films", Metallurgical Transactions A, Vol. 20A, 2217-2245, Nov. 1989
- [3] Mark G. Allen, Mehran Mehergany, Roger T. Howe and Stephen D. Senturia, "Microfabricated Structures for the in-situ measurement of residual stress, Young's modulus, and ultimate strain of thin films", Appl. Phys. Lett., 51(4), 241-243, Jul. 1987
- [4] W. Kim and M. G Allen, "Surface micromachined platforms using electroplated sacrificial layers.", TRANSDUCERS '91. 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators., p.651-4, 1991
- [5] T. Howe and P. S. Muller, "Stress in polycrystalline and amorphous silicon thin films", J. Appl. Phys., 54, 4674-4675, 1983
- [6] Guckel, T. Randazzo and D. W. Burns, "A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with application to polysilicon", J. Appl. Phys., 57, 1671-1675, 1985
- [7] Cloud et al., "Processing and Performance of gold MCM's", IEEE trans. CHMT, vol. 16, no. 7, 754-730, Nov. 1993
- [8] Kurt E. Petersen and C.R Guarnieri, "Young's Modulus Measurements of Thin Films using Micromechanics", J. Appl. Phys., 50(11), 6761-6766, Nov. 1979
- [9] Timoshenko and D. H Young, "Vibration Problems in Engineering", 3rd Ed., D. Van Nostrand, 1955
- [10] Cyril M. Harris, Shock and vibration handbook 3rd ed., New York McGraw-Hill, 1988