

논문 2003-12-6-05

파이렉스 #7740 유리박막을 이용한 MEMS용 MLCA와 Si기판의 양극접합 특성

정귀상*, 김재민*, 윤석진**

Anodic bonding Characteristics of MLCA to Si-wafer Using Evaporated Pyrex #7740 Glass Thin-Films for MEMS Applications

Gwiy-Sang Chung*, Jae-Min Kim* and Suk-Jin Yoon**

요 약

본 논문은 파이렉스 #7740 유리박막을 이용한 MEMS용 MLCA (Multi Layer Ceramic Actuator)와 Si기판의 양극접합 특성에 관한 것이다. 최적의 RF 마그네트론 스퍼터링 조건 (Ar 100 %, input power 1 W/cm²)하에서 MLCA기판위에 파이렉스 #7740 유리의 특성을 갖는 박막을 증착하였다. 450℃에서 1시간 열처리한 다음, -760 mmHg, 600 V 그리고 400℃에서 1시간동안 양극접합했다. 그 다음에 Si 다이어프램을 제조한 후, MLCA/Si 접합계면과 MLCA 구동을 통한 Si 다이어프램 변위특성을 분석 및 평가하였다. 다이어프램 형상에 따라 정밀한 변위 제어가 가능했으며 0.05-0.08 %FS의 우수한 선형성을 나타내었다. 또한, 측정동안 접합계면 균열이나 계면분리가 일어나지 않았다. 따라서, MLCA/Si기판 양극접합기술은 고성능 압전 MEMS 소자 제작공정에 유용하게 사용가능할 것이다.

Abstract

This paper describes anodic bonding characteristics of MLCA (Multi Layer Ceramic Actuator) to Si-wafer using evaporated Pyrex #7740 glass thin-films for MEMS applications. Pyrex #7740 glass thin-films with same properties were deposited on MLCA under optimum RF magneto conditions (Ar 100 %, input power 1 W/cm²). After annealing in 450℃ for 1 hr, the anodic bonding of MLCA and Si-wafer was successfully performed at 600 V, 400℃ in -760 mmHg. Then, the MLCA/Si bonded interface and fabricated Si diaphragm deflection characteristics were analyzed through the actuation test. It is possible to control with accurate deflection of Si diaphragm according to its geometries and its maximum non-linearity is 0.05-0.08 %FS. Moreover, any damages or separation of MLCA/Si bonded interfaces do not occur during actuation test. Therefore, it is expected that anodic bonding technology of MLCA /Si wafers could be usefully applied for the fabrication process of high-performance piezoelectric MEMS devices.

Key Words : Anodic Bonding, MLCA, Pyrex #7740 Glass, MEMS, Diaphragm Deflection

1. 서 론

* 동서대학교 정보시스템공학부(School of Information and System Engineering, Donseo University.)

** 한국과학기술연구원 박막기술연구센터 (Korea Institute of Science and Technology)

<접수일자 : 2003년 8월 27일>

압전세라믹은 구동력이 크고 동작속도가 빠르며 전기-기계적 변환에 따른 구동효율이 좋기 때문에 최근 약물전달시스템(Drug Delivery System) 및 화학분석시스템(Chemical Analysis System) 등과 같이 극미량의

가스 및 유체를 제어하는 Bio- MEMS (Micro Electro Mechanical System) 제작에 있어 고정밀 제어용 구동부로 사용하기 위한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 현재까지 압전세라믹중에서도 압전박막형 마이크로 센서 및 액추에이터에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 압전박막은 극미세제어를 필요로 하는 유체제어시스템 등에 적용 가능한 응답속도를 가지고 있지 못하며 변위정밀도와 발생력, 공진 주파수가 낮은 문제점을 가지고 있기 때문에 향후 우수한 열손실 특성뿐만 아니라, 변위 정밀도가 우수하고 동작시간이 짧은 MLCA(Multi Layer Ceramic Actuator)가 MEMS용 액추에이터로 크게 각광받을 것으로 기대된다.^(1, 2)

Si를 기반으로 하는 MEMS의 경우, 압전 세라믹과 Si간의 직접적인 접합은 시스템의 고도화, 집적화 및 기능향상을 위한 가장 중요한 기술 중 하나이다. 지금까지는 대부분의 연구에서 epoxy 등의 유기접착제를 이용하여 압전 세라믹과 Si기판간 접합을 수행하였다. 그러나 유기접착제의 경우, 외부오염의 우려가 있고 접착제의 두께조절이 대단히 어렵기 때문에 공정오차의 큰 요인으로 작용할 수 있으며 접착제의 종류와 점도에 따라 접착강도가 달라지는 문제점을 가지고 있다. 또한, 최근 마이크로머시닝기술의 급격한 발전에도 불구하고 많은 연구들이 Si-Si기판간 직접접합 혹은 파이렉스 #7740 유리-Si기판의 양극접합에 집중되면서 세라믹과 반도체간 이중접합 기술은 접합공정과 메커니즘 규명 등에 있어 많은 기술적 한계를 가지고 있다.⁽³⁻⁵⁾

양극접합은 유기접착제에 의한 접합보다 강도(약 350 psi 이상)와 내열성이 크며 fusion bonding과 같은 기존 접합 방식에 비해 500°C 이하의 저온에서도 공정이 가능하다. 특히 유리박막을 접합 매개층으로 이용한 양극접합의 경우, 저전압에서 접합이 가능하기 때문에 압전세라믹과 Si기판의 물리적·전기적 특성 및 소자 제작시 전·후 공정에 영향을 주지 않는 장점을 가지고 있다. 한편 K. Tanaka 등이 양극접합을 이용하여 PZT disk와 Si기판간 접합을 수행하면서 인가전압과 온도에 따른 접합가능성을 제시했지만,⁽⁶⁻⁷⁾ 실질적으로 접합강도 향상을 위해서는 매개층으로 사용할 유리박막의 표면 거칠기 및 조성

분석 등 증착된 박막에 대한 제반 특성평가가 접합전 선행공정으로써 매우 중요하다.

본 연구는 MLCA를 이용한 고성능 압전형 MEMS를 개발하기 위한 선행연구로써 MLCA와 Si기판의 양극접합에 관한 것이다. 유기접착제에 의한 접합보다 강도와 내열성이 크며 다른 열접합 방식에 비해 저온, 저전압에서 공정이 가능한 양극접합기술을 이용하여 파이렉스 #7740 유리박막을 매개층으로 MLCA와 Si기판간 양극접합용 유리박막의 증착 및 접합특성을 분석하였다.

따라서, 본 연구에서는 유전체이면서 절연 특성을 가지는 파이렉스 #7740 유리를 RF 마그네트론 스퍼터링법으로 MLCA 표면에 박막 증착한 후, MLCA와 Si기판간 정전기력을 이용한 양극접합을 수행하였다. 그리고 유리박막을 이용하여 양극접합이 가능한 최적의 RF 스퍼터링 조건을 도출하고, SEM (Scanning Electron Microscopy)을 이용해 접합계면 특성을 분석하였다. 최종적으로, MLCA와 접합한 Si를 다이어프램으로 가공한 후, 마이크로 센서 및 유체제어시스템 등의 압전 구동부로 사용하기 위하여 레이저 변위계(Sensing Part-AT0061, Deflection Analyzer- AT3700, Graphtec, Japan)를 이용한 신뢰성 평가를 수행하였다.

II. 실험

1. 박막 증착

그림 1은 접합에 사용된 MLCA와 Si기판, 파이렉스 유리의 종류별 열팽창계수를 각각 나타낸 것이다. 석영, #7059 유리 등과 비교할 경우, 파이렉스 #7740 유리 계열이 500°C 이내에서 MLCA 및 Si과 가장 유사한 열팽창계수를 가짐을 알 수 있다.⁽⁷⁾ 한편 MLCA와 Si기판간의 양극접합이 가능하기 위해서는 MLCA 표면에 증착할 유리 내부에 전기전도에 기여할 수 있는 이동이온을 많이 포함하고 있어야 한다.⁽⁸⁾ 파이렉스 #7740 유리는 #1729 유리에 비해 수 배 이상의 이동이온(Na^+ , >2.5 %)을 함유하고 있다. 따라서, 파이렉스 #7740 유리가 MLCA/Si기판간 접합매개층으로서 강한 결합력을 가지는 대면적 접합에 가장 이상적임을 알 수 있다.

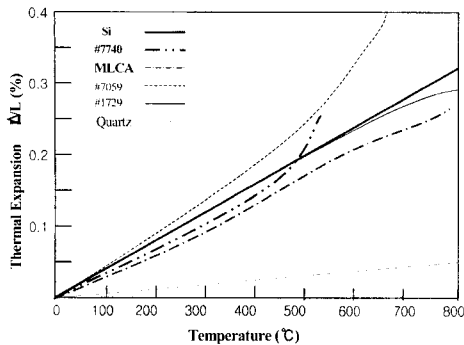


그림 1. MLCA, Si 및 파이렉스 glass 종류별 열 팽창계수 비교

Fig. 1. Thermal expansion coefficients of MLCA, Si and sorts of Pyrex glass, respectively.

증착한 유리박막을 매개층으로 MLCA와 Si 간 접합을 행할 경우, 열팽창계수와 Na⁺ 이온의 함유량, 표면 평탄도 등 파이렉스 #7740 유리 타겟과 동등한 조건을 가지는 유리박막의 증착이 무엇보다 중요하다. 따라서, RF 마그네트론 스퍼터링법으로 파이렉스 #7740 유리박막을 MLCA 위에 증착할 경우, Ar과 O₂ 가스 분압비와 인가전력에 따라 유리박막을 증착한 다음, XPS (X-ray Photo-electron Microscopy), AFM (Atomic Force Microscopy), 식각을 등을 이용하여 파이렉스 #7740 유리와 동등한 물성을 가지는 최적의 RF 마그네트론 스퍼터링 증착조건을 분석하였다. 표 1은 RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용한 파이렉스 #7740 유리박막의 증착 및 열처리 조건을 각각 요약한 것이다.

2. 양극접합

본 연구에서는 5 μm 두께의 파이렉스 #7740 유리박막이 증착된 MLCA(5×5×20 mm)와 직경 2×2 cm, 두께 510 μm의 p-type(100) Si기판을 사용하였다. 먼저, Si기판에 존재하는 표면 오염물을 제거하고 hydrophilic 성질을 유지하기 위하여 HCl, H₂SO₄, BHF (buffered HF) 등을 순차적으로 사용한 반도체 세정공정을 행하였다. 또한 micro-soap, TCE(trichloroethylene), IPA(Iso-propyle alcohol) 등을 이용해 MLCA표면에 증착한 glass를 각각 20분 동안 초음파 세정하였다. 세정이 완료된 두 장의 기판은 진공도 -760 mmHg,

표 1. RF 마그네트론 스퍼터링법에 의한 파이렉스 #7740 유리박막의 증착 및 열처리 조건

Table 1. Deposition and annealing conditions of Pyrex #7740 glass thin-films by RF magnetron sputtering, respectively

Method	RF sputtering
Target(2")	Pyrex #7740 glass
RF Power density	1~3 W/cm ²
Sputtering gas	O ₂ /Ar=40/60~0/100
Base pressure	2×10 ⁻⁵ Torr
Working pressure	4×10 ⁻⁵ Torr
Deposition rate	0.1 μm/hour
Substrate temp.	Room temp.
Annealing conditions	450°C, 1 hr.

인가전압 600 V 그리고 인가온도 400°C에서 1시간동안 양극접합을 수행하였다. 또한, SEM 및 레이저 변위계 등을 이용해 접합계면 및 Si 다이어프램 변위특성 등을 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 박막 특성평가

표 2는 Ar/O₂ 가스 분압비 및 인가전력에 따라 증착된 파이렉스 #7740 유리박막의 XPS 성분비 분석 결과를 나타낸 것이다. 스퍼터링 타겟으로 사용된 파이렉스 #7740 유리의 Na⁺ 이온 함유량은 2.5 %이며 분위기가스 Ar 100 %, 인가전력 1.0 W/cm²에서 증착된 유리박막의 Na⁺ 이온 함유량은 1.685 %로 측정되었다. 한편, 스퍼터링 증착시 O₂ 가스가 첨가된 경우, Na⁺ 이온 함유량은 0.913~1.262 %이며 또한, 인가전력이 높을 경우에는 0.96~1.30 %였다. 따라서, 파이렉스 #7740 유리박막을 이용하여 양극접

합할 경우, RF 마그네트론 스퍼터링시 Ar 가스만 사용하고 낮은 인가전력에 증착하는 것이 적합함을 알 수 있다.

표 2. 증착된 파이렉스 #7740 유리박막의 XPS 성분비

Table 2. XPS composition ratio of sputtered Pyrex #7740 glass thin-films

Elements		Si(%)	O(%)	Na(%)
Materials				
Bulk Pyrex #7740 glass		23.4	69.52	2.5
Deposited thin-films (Ar/O ₂ flow ratio, sccm)	20/-	22.36	5328	1.69
	18/2	23.56	51.3	1.26
	16/4	24.06	52.57	1.16
	14/6	25.63	52.42	0.91
	12/8	25.98	51.45	1.0
Deposited thin-films (Power density, W/cm ²)	1	22.36	52.74	1.69
	2	23.65	51.93	1.30
	3	25.97	51.26	0.96

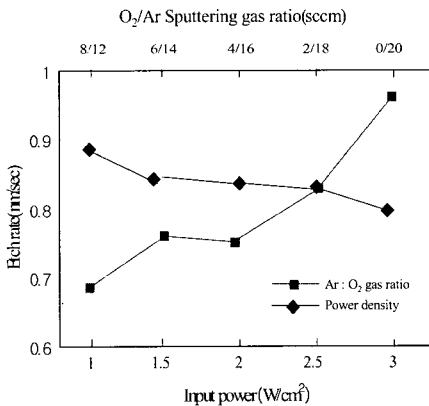


그림 2. Ar/O₂ 가스 분압비와 인가전력에 따른 파이렉스 #7740 유리박막의 식각율

Fig. 2. Etch rate of sputtered Pyrex #7740 th glass thin-films as functions of Ar/O₂ gas flow ratio and input power density, respectively.

그림 2는 450°C, 1시간동안 열처리한 후, BHF(HF/NH₄F/H₂O=30 ml/20 g/200 ml)를 이용하여 증착된 파이렉스 #7740 유리박막의 식각율을 측정한 분석결과이다. 일반

적으로 식각율이 높을수록 SiO₂를 제외한 B₂O₃, Al₂O₃, Na₂O 성분들을 많이 포함하고 있으며,^[9-10] Ar 100 %, 인가전압 1 W/cm²에서의 식각율은 각각 970, 890 Å/min으로써 상대적으로 가장 많은 Na₂O 성분 등을 함유하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 제시된 XPS 결과와 일치하며 따라서, Ar을 단일 분위기 가스로, 인가전력 1 W/cm² 이하의 저전력에서 파이렉스 #7740 유리박막 증착시 Na⁺ 이온 함유량을 증가시키고 열팽창계수 변화를 최소화할 수 있음을 보여준다.

한편 기판 접합시 MLCA 표면에 증착된 파이렉스 #7740 유리박막의 표면 거칠기는 MLCA와 Si의 접합강도에 큰 영향을 미치며 또한, 거칠기가 양호할수록 공정간 접합온도를 최대한 낮출 수 있다. 450°C, 1시간 열처리 후, 1~3 W/cm²로 인가전력을 조절하면서 유리박막을 증착한 AFM 이미지를 그림 3에 나타내었다. 유리박막 증착시 인가전력이 낮을수록 최대 31Å까지 표면 거칠기가 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서, 이상의 분석결과를 통하여 Ar 단일 분위기 가스, 인가전력 1 W/cm²를 RF 마그네트론 스퍼터링 최적 증착조건으로 결정한 후, MLCA 표면에 양극접합용 파이렉스 #7740 유리박막을 증착하였다.

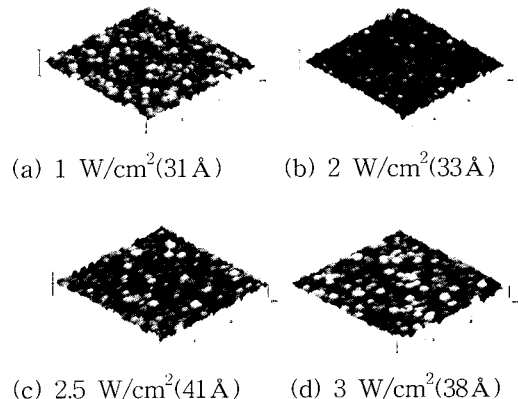


그림 3. 인가전력에 따른 증착된 파이렉스 #7740 유리박막 표면의 AFM 이미지 (Ar 100 %)

Fig. 3. AFM images of sputtered Pyrex #7740 glass thin-film surfaces according to input power density, respectively(Ar 100 %).

2. 접합특성 분석

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링법으로 MLCA 위에 증착된 파이렉스 #7740 유리박막의 응력완화를 위해 450°C에서 1시간 열처리한 후, MLCA와 hydrophilic 처리된 Si기판을 -760 mmHg 챔버내에서 400°C, 600 V의 인가조건으로 접합을 수행하였다. 그림 4는 접합이 성공한 MLCA/Si기판의 접합 단면 SEM 이미지이다. 유리박막이 증착된 MLCA와 Si기판 사이에 미접합계면이 존재하지 않는 완벽한 접합이 형성되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 최소 1.5 μm 이상의 두께에서 접합이 성공하는 것을 확인하였는데, 이는 유리박막 형성시 박막 두께가 증가할수록 상대적으로 표면 거칠기가 감소하면서 Na⁺ 이온 함유량이 증가하기 때문이라 사료된다. 따라서, 스퍼터링법에 의한 파이렉스 #7740 유리박막 증착시, 표면 거칠기의 완화를 위해 MLCA/Si기판 접합시 유리박막의 최소 두께가 1.5 μm 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

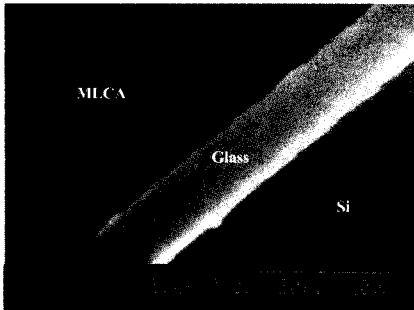


그림 4. MLCA/glass/Si 접합경계면 SEM 사진
Fig. 4. SEM image of MLCA/glass/Si bonded interface.

최종적으로 접합이 완료된 MLCA/Si 샘플은 100°C 온도의 실리콘 오일내에서 30 kV/cm²의 전계를 10분간 인가하여 분극 재처리를 행하였다. 또한 분극처리한 후, 인가전압 100 V에서 16 μm(±0.1 μm) 정밀 변위를 가지는 MLCA를 이용하여 Si 다이어프램을 구동시키기 위해, MLCA가 접합된 Si기판의 후면으로 photolithography 공정을 이용한 다이어프램 식각 패턴을 형성한 다음, TMAH 20 wt.% 이등방성 수용액(80±1°C)을 이용하여 후면 습식식각을 시행하였다. 또한

MLCA의 기계적 변위특성을 평가하기 위하여 서로 다른 직경(9, 12, 15, 18 mm, non-bonded)과 두께(100, 150, 200, 250, 300, 400 μm)를 갖는 Si 다이어프램을 각각 제조하였다. 그리고 DC 전압을 0-100 V까지 점차적으로 인가하면서 레이저 변위계를 이용하여 각각의 Si 다이어프램에 대한 변위특성을 측정하였다. 그림 5는 Si 다이어프램의 직경에 따른 MLCA/Si 다이어프램 구조의 중심부 최대 변위량을 측정한 것이다. 측정결과, DC 100 V까지 인가전압이 증가하면서 Si 다이어프램 변위량이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 다이어프램 면적에 따른 최대 비선형성은 0.05-0.08 %FS, 히스테리시스는 0.53-1.19 %FS로써 Furutani 등의 연구결과와 거의 동등하였다.^[11] 제조된 MLCA/Si 다이어프램 접합구조가 기계적 변위특성을 그대로 유지하는 것은 양극접합공정으로 인한 capacitance, coupling factor와 같은 물성치의 저하현상이 발생하지 않았기 때문으로 생각된다. 또한, 변위측정간 MLCA/Si 다이어프램 접합구조의 어떠한 파손이나 접합계면 분리도 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

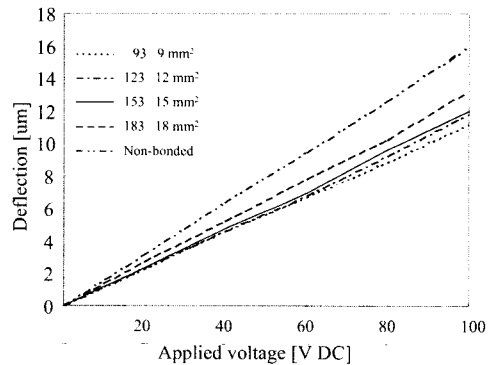


그림 5. Si 다이어프램 면적에 따른 MLCA 최대 변위 분석
Fig. 5. Analysis of the MLCA deflection as functions of different Si diaphragm size.

그림 6은 인가전압에 따른 Si 다이어프램의 예상 변위량과 실제 변위측정값을 비교한 것이다. 다이어프램 면적 18 mm²에서 중심부 최대 변위량이 최대 13.2 μm까지 증가하였으며 레이저 변위계를 이용한 반복 측정 결과가 예

상변위값과 중첩되는 것을 알 수 있다.

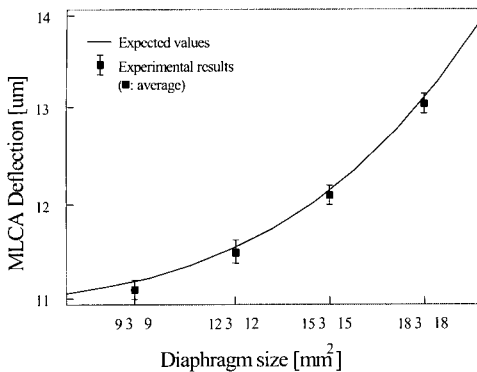


그림 6. Si 다이어프램 면적에 따른 예상 및 측정 변위 비교

Fig. 6. Deflection comparison with analysis and experimental results as functions of different Si diaphragm size.

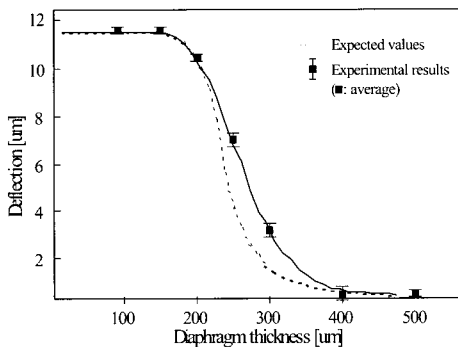


그림 7. Si 다이어프램 두께에 따른 예상 및 측정 변위 분석

Fig. 7. Deflection comparison with analysis and experimental results as functions of different Si diaphragm thickness.

그림 7은 다이어프램 두께에 따른 접합 샘플의 최대 변위값을 측정된 것이다. 그림에서 MLCA의 큰 구동력(750 N)으로 인해 다이어프램 두께 200-300 μm 에서 예상 변위값보다 훨씬 큰 10.2-3.4 μm 의 변위특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Si 다이어프램의 두께가 증가함에 따라 다이어프램 중심부 변위량이 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서, MLCA와 접합된 Si기판 식각시 다이어프램 두께를 정밀하게 설계하여 제조할

경우, 마이크로 센서 및 액추에이터 그리고 MEMS의 구동부로서 고신뢰도의 MLCA 변위제어가 가능함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 MLCA에 파이렉스 #7740 유리박막을 증착한 후, MLCA와 Si기판간 정전기력을 이용한 양극접합을 수행하였다. 또한, 유리박막의 증착조건에 따른 양극접합이 가능한 최적의 RF 마그네트론 스퍼터링 조건을 도출하고, SEM을 이용한 접합계면특성 및 구동 테스트를 통한 Si 다이어프램의 기계적 변위특성 등을 평가하였다. 분석결과, 양극접합이 가능한 RF 마그네트론 스퍼터링 박막 증착조건은 Ar 100 %, 인가전력 1 W/cm²였으며 박막이 증착된 MLCA와 Si기판간 완벽한 접합면이 형성된 것을 확인하였다. 또한 600 V, 400°C에서 1시간동안 MLCA/Si기판간 양극접합을 수행한 후, 이방성 식각공정으로 Si 다이어프램을 제조하여 구동 테스트를 하였다. 측정결과 Si 다이어프램 변위의 최대 비선형성은 0.05-0.08 %FS, 히스테리시스는 0.53-1.19 %FS이었으며 접합면의 어떠한 손상이나 계면분리 없이 고신뢰도를 가지는 Si 다이어프램 구동이 가능함을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구결과에서 얻어진 접합공정을 MLCA/Si기판 접합기술에 적용할 경우, 마이크로 밸브 및 펌프, 약물전달시스템, 유량조절기와 같은 고성능 MEMS 제작공정에 대단히 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 '차세대 소재성형 기술개발사업단'의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] N. Jalili, J. wagner and M. Dadfarnia, "A piezoelectric driven ratchet actuator mechanism with

- application to auto- motive engine valves". *Mechatronics*, vol. 13, pp. 933~956, 2003.
- [2] S. Hayamizu, K. Higashino, Y. Fujii, Y. Sando and K. Yamamoto, "Development of a bi-directional valve-less silicon micro pump controlled by driving wave-form", *Sensors and Actuators A*, vol. 103, pp. 83-87, 2003.
- [3] S. Weichel, R. Rous and M. Rindahl, "Silicon-to-silicon wafer bonding using evaporated glass", *Sensor and Actuators A*, vol. 70, pp. 179~184, 1998.
- [4] H. Quenzer, A. V. schulz, T. kinkopf and T. Helm, "Anodic-bonding on glass layers prepared by a spin-on-glass process: preparation process and experimental results", *The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 230~233, 2001.
- [5] W. B. Choi, B. K. Ju, Y. H. Lee, M. R. Haskard, M. Y. Sung, M. H. Oh, "Anodic bonding technique under low temperature and low voltage using evaporated glass", *J. Vacuum Science and Technology*, vol. B15, no. 2, pp. 477~481, 1997.
- [6] K. Tanaka, E. Takata and K. Ohwada, "Anodic bonding of lead zirconatetitanate ceramics to 1992년 2월 일본 도쿄하시 silicon with intermediate glass layer", *Sensors and Actuators A*, vol. 69, pp. 199~203, 1998.
- [7] G. Sasaki, H. Fukunaga, T. Suga and K. Tanaka, "Mechanism of the anodic bonding between PZT ceramics and silicon wafer", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 51, pp. 174~177, 1997.
- [8] T. Rogers and J. Kowal, "Selection of glass, anodic bonding conditions and material compatibility for silicon-glass capacitive sensors", *Sensors and Actuators A*, vol. 46-47, pp. 113~120, 1995.
- [9] A. S. Sandhu and K. Singh, "Etching and annealing studies of nuclear tracks in glasses", *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 61, pp. 579~581, 2001.
- [10] J. W. Berenschot, J. G. E. Gardeniers, T. S. J. Lammerink and M. Elwenspoek, "New applications of r.f.-sputtered glass thin films as protection and bonding layers in silicon micromachining", *Sensors and Actuators A*, vol. 89, pp. 338~343, 1994.
- [11] K. Furutani, M. Urushibata and M. Mohri, "Displacement control of piezoelctric element by feedback of induced charge", *Nanotechnology*, vol. 9, pp. 93~98, 1998.

著 者 紹 介

정 귀 상
『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-16 p.131
참조
1982년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
1985년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)

기술과학대학 졸업 (공학박사)
1993년 - 현재 동서대학교 정보시스템공학부
부교수
주관심분야 : Si, SOI, SiC 및 SiCN-
M/NEMS, 압전 및 SMA 액추에이터

김 재 민

2002년 2월 동서대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2002년 - 현재 동서대학교 대학원 전자공학과 재학중

주관심 분야 : Si 및 Bio-MEMS, 압전 액츄에이터

**윤 석 진**

1983년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1985년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업(공학석사)

1992년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사)

1992 - 현재 한국과학기술연구원 박막기술연구센터 책임연구원

주관심 분야 : 액츄에이터, 고주파 유전체