대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 E pp. 169~174 KSME 01S537

MEMS-based 마이크로 터보기계의 개발

박건중*· 민홍석**· 전병선*· 송성진***· 주영창****· 민경덕***· 유승문***

Development of MEMS-based Micro Turbomachinery

Kun Joong Park*, Hong Seok Min**, Byung Sun Jeon*, Seung Jin Song***, Young Chang Joo****, Kyoung Doug Min*** and Seung-Mun You***

Key Words: Micro Turbomachinery System(마이크로 터보기계 시스템), High Aspect Ratio Structure(고종횡비 구조), 3-D Integrated Process(3차원 통합 공정), Deep Reactive Ion Etching(깊은 반응성 이온 식각), Wafer Direct Bonding(웨이퍼 직접 접합)

Abstract

This paper reports on the development of high aspect ratio structure and 3-D integrated process for MEMS-based micro gas turbines. To manufacture high aspect ratio structures, Deep Reactive Ion Etching (DRIE) process have been developed and optimized. Specially, in this study, structures with aspect ratios greater than 10 were fabricated. Also, wafer direct bonding and Infra-Red (IR) camera bonding inspection systems have been developed. Moreover, using glass/silicon wafer direct bonding, we optimized the 3-D integrated process.

1. 서 론

MEMS-based 마이크로 터보기계 시스템이란 반도체 공정 기술을 이용하여 제작되는, 크기가 cm^3 단위 이내인 초소형 압축기, 펌프, 터빈 등 고속으로 회전하면서 유체에 에너지를 가하거나 유체로부터 에너지를 얻어내는 turbomachinery-on-a-chip 개념의 새로운 초소형 터보기계 장치를 일컫는다. Rotor, stator, gas bearing, inlet/outlet flow channel 등 다양한 장치가 복합적으로 구성된 MEMS-based 마이크로 터보기계 시스템은 10^6 rpm 급, 300m/s~500m/s 범위의 고속, 압력비 2:1~4:1 범위의 고압, 최고 1600℃ 에 이르는 고온 등의 극한 작동 환경에서 일을 하거나 동력을 발생시키는 기계적인 MEMS 로서, 트랜스듀서로서의 역할에 치중된 지금까지의 MEMS 영역을 뛰어넘는, 매우 도전적이고 새로운 시스템이다. 또한, 앞으로 화학전지를 대체할 수 있는 초소형 고에너지밀도 휴대용 발전기, 고발열 반도체 칩 냉각을 위한 초소형 냉각장치, 그리고 초소형 무인 항공기(Micro Air Vehicle, MAV), 초소형 인공위성, 초소형 로켓엔진 등의 추진장치, 경계층, 와류 등 추진체 표면에서의 공력 손실을 제어하는 장치 이외에도 새롭게 창출할 수 있는 다양한 분야에 이용될 수 있어 미래 지향적인 새로운 장치이다.

이러한 MEMS-based 마이크로 터보기계 시스템은 기존 MEMS 영역과 차이를 보이는 새로운 길이 단위, 형상, 재료 등에 바탕을 두기 때문에, 이에 맞는 설계 및 제작 기술에 대한 연구가 필수적으로 요구된다. 일찍이 미국 MIT 의 Gas Turbine Laboratory 에서는 이 분야에 대한 진보적

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
** 서울대학교 재료공학부 대학원
*** 서울대학교 기계항공공학부
**** 서울대학교 재료공학부
E-mail: kjpark2@snu.ac.kr
TEL: (02)880-1701 FAX: (02)883-0179

인 연구 성과를 발표해 왔으며, 특히 최근 연구 발표에서는 가스 베어링을 이용하여 1,000,000 rpm 이상으로 고속 회전하는 마이크로 터빈을 제작하였다.

본 연구진은 이러한 마이크로 터보기계 시스템에 대한 연구 추세와 국내 MEMS 연구 기반을 바탕으로 고속으로 회전하는 마이크로 터빈 제작과 이에 대한 설계 및 평가와 관련된 패키징에 대하여 연구하였다. 특히 회전하는 마이크로 기계를 제작함에 있어 제작에 대한 정밀성과 설계의 안정성이 필수적으로 수반되어야 하기 때문에, 본 연구에서는 MEMS-based 마이크로 터보기계를 제작하는 데 있어서 필수적으로 요구되는 Deep Reactive Ion Etching (DRIE) 과 Aligned wafer bonding 기술을 최적화하여, High aspect ratio structure 와 3-D integrated process를 개발하였다. DRIE 의 경우, 정밀한 수직성을 구현하기 위해 식각 특성 파악에 따른 최적화된 공정 조건 확립이 필요하며, Aligned wafer bonding 의 경우, 5장의 웨이퍼를 나란히, 그리고 틈새없이 접합시키기 위한 공정 기술에 대한 연구가 진행되었다. 또한 High aspect ratio structure 와 3-D integrated process 의 공정 기술과 함께 설계 및 패키징 연구 결과를 바탕으로, 궁극적으로 고속으로 회전하는 MEMS-based 마이크로 터빈을 제작하고자 하였다.

2. 설계 및 패키징

Fig. 1 은 고압, 고속의 유체로부터 에너지를 받아 고속으로 회전하면서 유체 에너지를 기계적일로 변환시키는 초소형 터빈을 보여준다. 5장의 웨이퍼를 접합한 1.5cm×1.5cm×2.5mm 크기의 실리콘 터빈 장치의 중심에는, 직접 유체와 상호작용을 하는 반지름이 2mm 인 로터와 노즐 가이드 베인으로 구성된 중심 플레이트가 있으며, 로터 블레이드와 노즐 가이드 베인의 개수는 각각 24개, 31개이다. 중심 플레이트를 중심으로 위아래 각각 2개씩의 플레이트가 있는데, 이 4개의 플레이트는 로터를 회전시키는 주 유체와 로터의 축방향 및 반경방향 힘을 지지하기 위한 가스 베어링 유체의 공급과 배출을 위해 설계되었다.

터빈 내의 입출구 형상과 마하수를 알면 압축성 유동에서의 입출구 압력비를 계산할 수 있다.

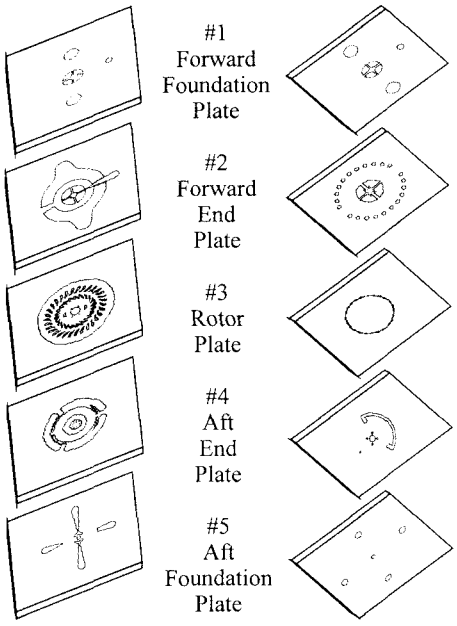
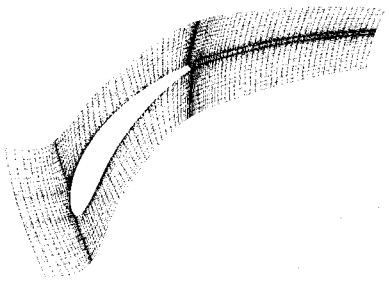
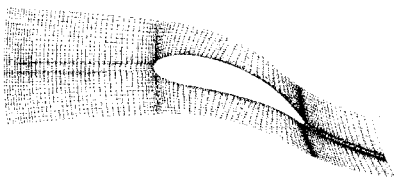


Fig. 1 Top and bottom view of the five wafer bonded micro turbine system.

그러나 실제로는 블레이드의 경계층과 같은, 형상에서 발생하는 압력 손실 등을 고려해야 하며, 이때 가장 크게 고려되어야 하는 손실은 표면에서의 마찰이다. 상용 터빈 블레이드의 경우 레이놀즈 수가 10^5으로 난류 유동이지만, 본 연구에서는 scale 의 영향으로 인하여 2×10^4정도로 낮아지게 되어 층류 유동 영역으로 보아야 한다. 따라서 상용 터빈 블레이드에 비해 점성력의 영향이 상대적으로 커지게 되고, 이것은 장치 내에서의 마찰 손실이 상대적으로 커지는 결과를 가져온다. 또한 장치 내에서의 유로는 3차원 형상 가공을 할 수 없는 반도체 공정의 특성상 모두 수직으로 꺾이는 형상을 하고 있다. 이것은 수직 부분을 라운딩 처리하였을 때보다 많은 압력 손실을 가져오게 된다. 이러한 요소를 예측하기 위해 Moody Chart 를 이용하여 마찰을 고려한다. 그러나 이것은 대략적인 값이므로 정확한 값을 확인하기 위해서는 실험이 뒤따라야 한다. 그러나 실험에서도 전체 터빈 장치의 크기가 작기 때문에 장치의 입출구에서만 센서를 사용하여 측정할 수 있어, 각 부분에서의 정확한 손실은 CFD 를 통하여 유추할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Computational meshes: (a) rotor blade; (b) nozzle guide vane.

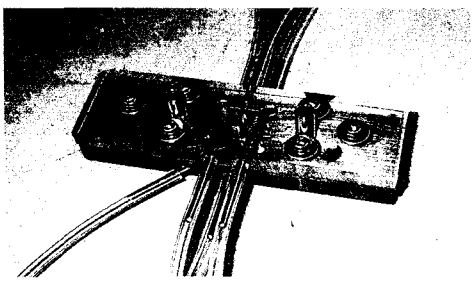


Fig. 3 A packaging device for silicon micro turbine system.

CFD 를 이용한 공력 설계를 위해, 유체 흐름의 지배방정식인 비선형 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 이산화한 상용 유동해석 프로그램인 STAR-CD 를 이용하여, 유체와 직접 에너지를 교환하는 터보기계 블레이드 주위에서의 3차원 정상 압축성 유동장을 계산하였다.

마이크로 터빈 장치의 핵심인 로터 블레이드와 노즐 가이드 베인 주위에서의 유동 해석을 위해, 주기조건이 적용된, 벽 근처로 갈수록 조밀한 비균일 mesh 를 구성하였다(Fig. 2).

한편 패키징에 있어서는 실리콘 터빈 장치와 외부 작동유체 공급원과의 연결, 그리고 회전 성능을 측정하기 위해, Fig. 3 과 같은 8개의 포트가 연결된 10cm×3cm×1.8cm 크기의 3개의 플레이트로 이루어진 장치를 설계, 제작하였다. 작동유체로는 질소가스를 이용하였으며, 설계 유량은 0.4 g/sec 이다. 또한 외부 연결관과 실리콘 장치 사이의 실링을 위해 지름이 2mm 인 O-ring 을 사용하였다.

3. 제작 방법

3.1 High aspect ratio structure

MEMS-based 마이크로 터보기계 시스템을 제작하는데 있어서 가장 필수적으로 요구되는 공정 기술은, 실리콘 기판에 대한 벌크 에칭을 기반으로 하는 High aspect ratio structure 제작 기술이다.

본 연구에서는 DRIE 공정을 위해 Plasma Therm Inductively Coupled Plasma (ICP) 장비를 사용하였다. 이 장비는 상부에서 최고 1000W 의 2MHz RF 를 공급하고, 하부에서는 최고 500W 의 13.56MHz RF 를 공급하는 구조를 갖고 있다. 또한 Dry pump 와 Turbo pump 를 이용하여 진공을 만들고, Lock chamber 를 통하여 4인치 기판을 Process chamber 로 이동시켜 식각하도록 되어 있다.

설계와 제작 방법 사이의 절충을 목적으로, Test pattern 을 제작하여 High aspect ratio 경향성을 파악하였다. 특히 ICP 장비의 Gas flow 와 식각 단위 시간에 대한 이해를 바탕으로, 최적화된 공정 조건을 확인하였다.

한편 식각 방법은 주로 Bosch process 를 이용하였다.[1]

3.2 3-D integrated process

2차원적으로 설계, 제작된 각 실리콘 기판은 Wafer bonding 방법에 의해 3차원 정렬을 이룬다. 이를 위해 Fig. 4 와 같은 실리콘/실리콘 기판 직접 접합법을 수행하였다.

본 연구에서는 기판 간의 적층시 야기되는 Mismatch 현상을 극복하기 위하여, 정렬 방법을

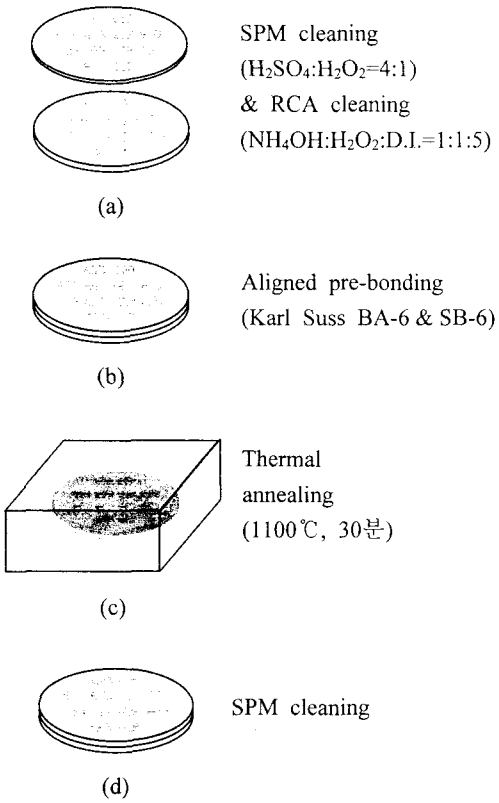


Fig. 4 Wafer bonding scheme: (a) initial cleaning; (b) aligned wafer direct bonding; (c) thermal annealing; (d) last cleaning.

최적화시키고 접합 후의 특성을 평가하는 방법을 보강하였다. 특히 Global align key 를 각 기판 앞뒤로 형성하여 놓는 Align 방법을 이용함으로서, 각 공정 중에 생길 수 있는 Mismatch 현상을 사전에 확인할 수 있도록 하였다.

또한 실제 상용화되어 있는 Bonding aligner (Karl Suss, BA6) 장비를 이용하여, Backside align control 에 의한 Pre-bonding 공정을 수행함으로서 수 ㎛ 이하의 정밀도를 유지하였다. 한편 접합 후에는 Infra-Red (IR) camera 촬영에 의한 접합률 측정을 통해 실제 접합된 기판 사이의 계면 특징을 분석하였다. 이는 MEMS-based 마이크로 터빈이 5개 기판의 적층에 의해 형성되는 구조물임을 상기할 때, 사전 Mismatch 에 대한 정보 검증을 위해 반드시 거쳐야 할 필수 공정이라 하겠다.

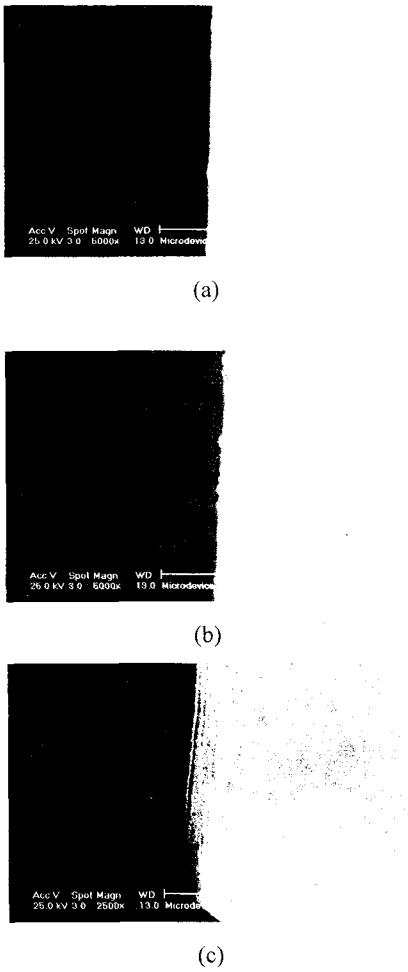
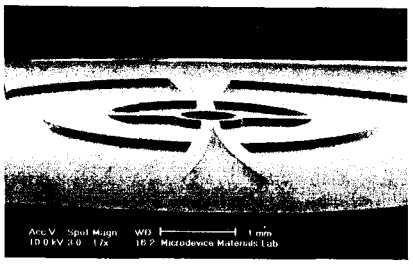


Fig. 5 Scalloping effects: (a) top; (b) middle; (c) bottom side in the high aspect ratio structure.

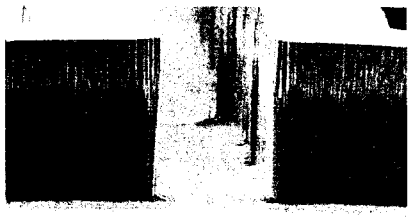
4. 제작 결과

4.1 High aspect ratio structure 제작

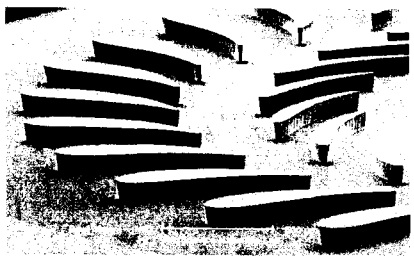
설계 단계에서 우선시 되는 1:10 이상의 High aspect ratio 구조물을 구현하기 위해 Test pattern 에 의한 특성 평가를 실시한 후 제작에 들어갔다. 이때 High aspect ratio structure 식각 공정에서 특히 유념한 점은 측면에 형성되는 Scalloping 패턴 현상이었다. 이는 Fig. 5 와 같이 High aspect ratio structure 의 측면 위치에 따라 다르게 나타



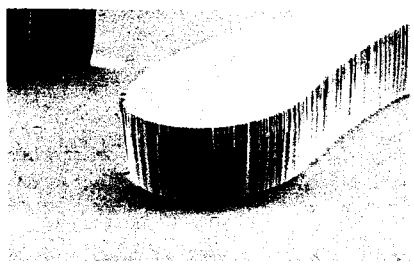
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Micro turbine fabrication results: (a) forward end plate; (b) air inlet/exhaust flow channel in 2nd plate; (c) rotor blades and nozzle guide vanes; (d) rotor blade.

나며, 기본적인 Bosch process 에서 예측되어 나타나는 일반적인 경향이다. 하지만, 이러한 Scalloping 패턴 현상을 최소화하는 것이 제작 단계에서 발생하는 오차를 줄일 수 있는 방법이므로, ICP 장비의 Gas 유량과 식각 단위 시간 조절을 통해 식각 속도 변화를 조정하였다.

한편 실제 제작 공정 중에 나타나는 Scalloping 패턴이 유동에 미치는 영향은 다음과 같다. 우선 Scalloping 패턴을 수직으로 가로지르는 방향으로는, 유동의 장애물 역할을 하게 되어 유동 박리를 일으키는 등 항력을 크게 증가시켜 압력 손실을 야기할 것이다. 두번째로 유동이 Scalloping 패턴에 나란하게 진행할 때, 층류 유동일 경우에는 단순히 유체 흐름과 맞닿는 벽의 표면적 증가로 인해 점성 손실이 더 커지게 되지만, Scalloping 크기가 유동 방향 보텍스보다 더 작은 난류 유동일 경우에는, 항력이 감소하는 효과도 예상할 수 있다.

Fig. 6 은 제작된 마이크로 터빈 장치를 보여준다. 식각된 패턴이 실제 터빈 구동에 미치는 영향을 고려할 때, Fig. 6(b) 에 나타난 입출구 유동 채널의 경우, 측면에 형성된 식각 잔유물로 인해 유동 저항성을 예상할 수 있다. 이는 유동의 경계층을 두껍게 하여 점성으로 인한 측벽으로부터의 유체 에너지 손실을 증가시킨다. 또한, 식각 잔유물의 불규칙적인 분포는 유체의 유동 방향 불균일성을 야기한다.

본 연구에서는 특히, 터빈 로터 블레이드 주위의 바닥면과 곡면 상태가 중요하므로, 이에 대한 식각 특징을 파악하는데 주력하였다. 제작 결과, 설계 패턴과 거의 비슷한 만족할만한 구조물을 얻었으며, Fig. 6(c) 와 같이 블레이드 간의 간격차에 의해 유발될 수 있는 바닥면의 굴곡을 방지하여 제작의 최적화를 이루어냈다. 한편 Fig. 6(d) 에서는 바닥면과 로터 블레이드의 매끈한 벽면을 확인할 수 있다.

4.2 3-D integrated process 개발

Fig. 7 은 패턴 없는 기판의 기판 직접 접합 상태를 보여주고 있다. 이는 Align 없이 단순히 접합 공정 자체의 Quality 평가를 의미하며, 공정 과정에서 발생하는 Particles 문제와 Pre-bonding 시 형성되는 Void 문제가 중요한 공정 변수임을 확인하였다. 이러한 문제점은 Class 100 이상의 청정한 환경과 Cleaning process 의 정확성을 통하여 개선되어질 수 있다. 한편 본 연구에서는 상

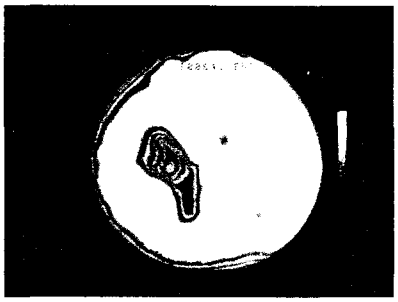


Fig. 7 IR camera picture: bare wafer bonding using Karl Suss BA-6.

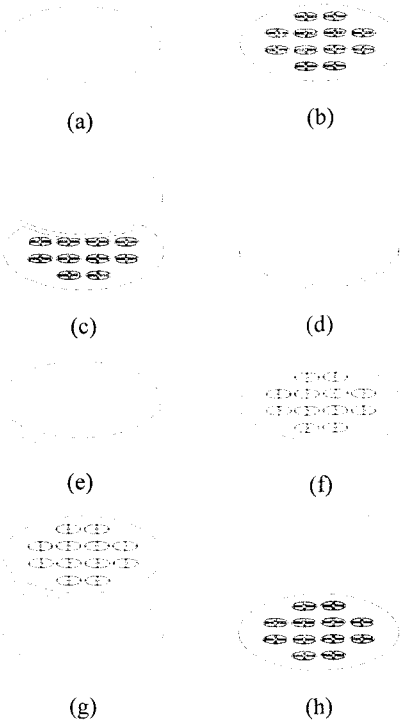


Fig. 8 Reversible seal package for 3-D integrated process: (a) initial DSP (double-side-polished) Si wafer; (b) front-side DRIE process; (c) cleaning before bonding; (d) glass/silicon wafer direct bonding; (e) cleaning before patterning; (f) back-side DRIE process; (g) separation of glass wafer; (h) last cleaning.

용화된 Bonding 장비를 이용하여 기판 접합을 하였다. 실험 결과를 볼 때, 전처리의 확실성만 확보된다면 실제 접합 응용에는 문제가 없다는 것을 확인하였다.

3차원 집적화에 있어 Process 문제는 기판 직접 접합을 위한 표면 보호 및 Cleaning 에 있다. 앞서 언급하였듯이 각 공정 중에 유발되는 여러 Particles 에 의해 기판 표면이 오염된다면 전체 구조물로서의 접합력을 얻기 어려울 것이다. 본 연구는 이러한 기판 직접 접합을 위한 Process 개발을 실시하였으며, Fig. 8 과 같은 Process flow 에 의하여 기판 접합을 최적화할 수 있음을 확인하였다.

본 연구진이 새롭게 개발한 Process 의 핵심 기술은 Fig. 8(c) 와 Fig. 8(d) 에 제시된 Glass/Si 또는 Quartz/Si 직접 접합 기술과 이를 Fig. 8(g) 에서 다시 재분리함으로써 가역적 밀봉 패키지를 할 수 있다는 점에 있다. 이러한 공정은 기존 기판 관통 식각을 하고자 할 때, 하부지지 기판을 접착제와 같은 재료로 부착하였던 방법보다 표면에 대한 오염물을 줄일 수 있고, 식각 중간에 기판 뒷면의 상태를 직접 관찰함으로써 정확한 식각을 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 기판 분리 후 Glass 또는 Quartz 를 재활용하게 되어 공정 단가를 줄일 수도 있다.

5. 결 론

고속으로 회전하는 초소형 터빈 제작을 위해서는 CFD 해석에 기반한 설계 디자인과 초정밀 기계 제작 공정에 의한 초소형 구조체 제작이 필수적이다. 본 연구에서는 1:10 이상의 High aspect ratio structure 와 3-D integrated process 를 개발하였으며, 특히, 유리/실리콘 기판 직접 접합에 의한 새로운 공정을 개발하였고 설계와 패키징 기술에 관한 연구를 함으로서 완성된 구조물 제작에 좀더 다가섰다.

참고문헌

(1) Ayon, A. A., Lin, C. C., Braff, R., Schmidt, M. A., and Sawin, H. H., 1999, "Characterization of a Time Multiplexed Inductively Coupled Plasma Etcher," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 146, pp. 339~349.