

論文98-35D-9-7

혼합 마이크로머시닝기술을 이용한 다층전극구조의 정전렌즈 제작

(Fabrication of multi-layered electrostatic lens by mixed micromachining technology)

李龍宰*, 全國鎭*

(Yongjae Lee and Kukjin Chun)

요 약

실리콘 벌크 마이크로머시닝과 표면 마이크로머시닝기술을 혼합하여 새로운 구조의 정전렌즈를 제작하였다. 표면 마이크로머시닝을 위한 구조층과 희생층으로는 폴리실리콘을 사용하였으며 구조층을 열산화막으로 보호하여 실리콘 습식 식각시 손상되지 않도록 하였다. 이전의 마이크로컬럼에 사용되던 정전렌즈에 비하여 이 구조가 갖는 장점은 1) 양극 접합의 수를 줄일 수 있어 구멍간 정렬, 렌즈의 생산성, 신뢰도, 손상 면에서 우수하고, 2) 마이크로컬럼의 집적화를 통한 arrayed lithography에도 유리하다는 것이다.

Abstract

We have fabricated electrostatic lens with novel structure by mixing surface- and bulk-micromachining technology. Polysilicon was used for both the structure and sacrificial layer, and the structure layer was passivated with thermal oxide in order not to be attacked during the silicon wet etching. Compared with conventional electrostatic lens used in microcolumn, this device has the advantages in ; 1) hole alignment, throughput, reliability, damage of lens, 2) the possibility of arrayed lithography through the integration of microcolumn.

I. 서 론

실리콘 마이크로머시닝기술(micromachining technology)은 실리콘 기판에 3차원 구조물을 제작하는데 이용되어 왔으며 주로 마이크로센서^[1](microsensor)나 액츄에이터^[2](actuator) 그리고 그 외의 여러 MEMS(Micro-Electro Mechanical System) 제작에 응용되어 왔다. 현재까지 알려진 마이크로머시닝기술은 크게 표면(surface) 마이크로머시닝기술과 벌크(bulk) 마이크로머시닝기술의 두 가지로 분류할 수 있

다. 본 논문에서는 위의 두 기술을 혼합하여 마이크로컬럼(microcolumn)에 장착되는 새로운 구조의 정전렌즈(electrostatic lens)를 제안한다.

마이크로컬럼은 현재의 전자빔표화시스템에 비하여 낮은 근접효과(proximity effect)와 높은 해상도 그리고 전자빔표화의 생산성을 극복할 수 있는 가능성 등으로 인하여 많은 연구가 수행되고 있다^{[3][4][5]}. 이 시스템은 그림 1과 같이 구성된다. 일반적으로 마이크로렌즈(source lens와 Einzel lens)는 2차원 구조의 실리콘과 Pyrex glass를 다층양극 접합(multi-layer anodic bonding)으로 조립하여서 제작된다^[6]. 이 때 전극간의 정렬은 광학현미경을 통하여 수행된다. 그러나 이 방법은 다음과 같은 문제점을 지니고 있다. 1) 광학 현미경을 이용한 전극간의 정렬이 쉽지 않고, 2) 양극 접합을 여러 번 수행함으로써 접합의 신뢰도, 손상, 렌즈의 생산성에 제약을 가져 올

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部, 半導體共同研究所 (ISRC(Inter-university Semiconductor Research Center) and School of Electrical Engineering, Seoul National University)

接受日字:1997年12月15日, 수정완료일:1998年7月28日

수 있으며, 3) 균일한 렌즈 특성을 얻기가 어렵다.

위에 기술된 문제점을 극복하기 위하여 새로운 구조의 자기정렬렌즈(Self-Aligned Microlens, SAM)를 제작하였다. SAM은 그림 2에서 보여지는 바와 같이 실리콘 웨이퍼(wafer)의 양면에 전극을 형성하였다. 각 전극은 중앙에 구멍이 형성되어 있는 microbridge의 형태를 취하게 된다. 각 전극의 사이에는 전자빔이 통과할 수 있는 동공(cavity)이 실리콘의 anisotropic etching에 의하여 형성되었고, SAM을 제작하기 위하여 실리콘 표면 마이크로머시닝기술과 벌크 마이크로머시닝기술을 사용하였다. 표면 마이크로머시닝기술을 이용하여 microbridge를 형성하였으며 벌크 마이크로머시닝기술을 이용하여 동공을 형성하였다. SAM을 제작함으로써 3차원 구조물을 한 실리콘 웨이퍼에 구현하는 것이 가능하였고, 두 전극이 양극 접합공정을 수행하지 않고도 잘 집적화될 수 있었다.

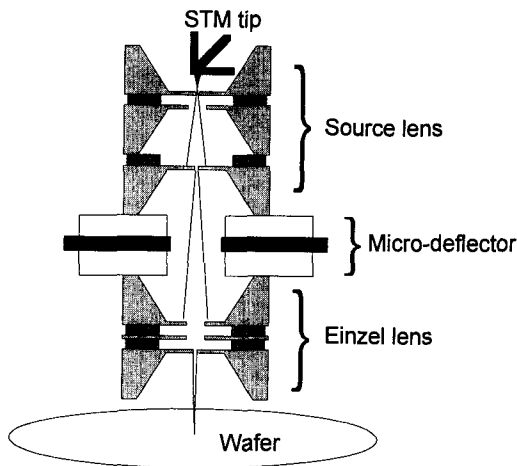


그림 1. 마이크로컬럼 전자빔표화 시스템
Fig. 1. Microcolumn e-beam lithography system.

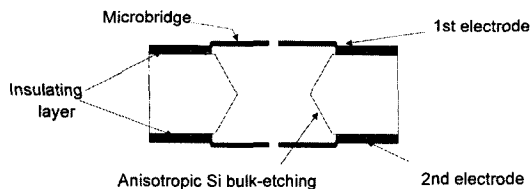


그림 2. SAM의 개략도
Fig. 2. The schematic view of SAM.

II. SAM 제작

SAM은 표면 마이크로머시닝기술과 벌크 마이크로

머시닝기술을 혼합하여 제작되었다. 표면 마이크로머시닝을 위한 희생층(sacrificial layer)과 구조층(structure layer)으로 폴리실리콘(polysilicon)을 사용하였다. 이 소자의 구조는 기판 실리콘과 희생층을 EDP (Ethylene-Diamine Pyrocatechol) 용액에서 동시에 식각함으로써 구현된다. 이 때 구조층은 열산화막(thermal oxide)에 의하여 보호된다. 전체 제작과정을 보여 주는 그림이 그림 3에 나타나 있다.

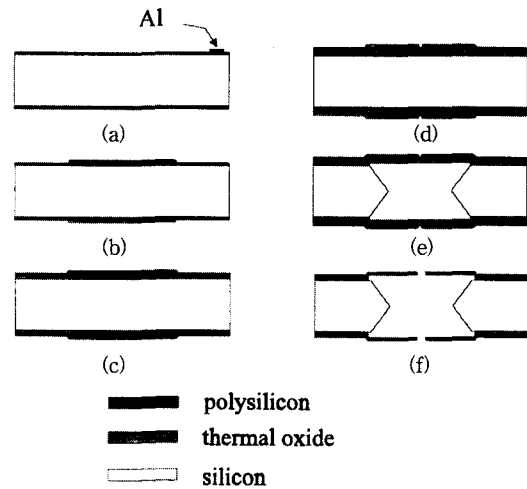


그림 3. SAM 제작의 공정 흐름도
Fig. 3. Process flow of SAM fabrication.

기판 물질은 직경이 4-inch이고 두께가 520 μ m인 p-type (100)으로서 양면이 폴리싱(polishing)된 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 그리고 웨이퍼를 4 : 1 H₂SO₄ : H₂O₂ 용액과 10 : 1 HF 용액을 사용하여 cleaning 공정을 수행하였다. LPCVD(low pressure chemical vapor deposition)에 의하여 희생층으로 사용될 폴리실리콘을 1 μ m의 두께로 증착한 후, 웨이퍼의 앞면에 300nm 두께의 알루미늄을 sputtering으로 증착하였다. 첫번째 마스크를 사용하여 알루미늄에 양면 정렬마크를 형성하고 16 : 1 : 1 : 2 H₃PO₄ : HNO₃ : CH₃COOH : H₂O 용액에서 식각한 다음, 이를 이용하여 양면 폴리실리콘에 정렬된 패턴을 두번째 마스크로 형성하였다. 양면 정렬은 IR lamp가 설치된 양면 마스크 정렬기(double side mask aligner)를 사용하였다. 양면의 폴리실리콘을 RIE(reactive ion etching)으로 식각하여 희생층 패턴을 형성한 후, 알루미늄을 제거하였다. Thermal oxidation을 통하여 1 μ m의 열산화막을 폴리실리콘에 성장하였는데 이는 구

조층 폴리실리콘의 아랫부분을 보호하고 전극간의 절연을 위한 층이다. 열산화막 위에 다시 LPCVD를 이용하여 $2\mu\text{m}$ 두께의 폴리실리콘을 증착한 후 POCl_3 로 도핑하고, drive-in을 4시간 동안 수행하였다. 이는 drive-in을 1시간 수행하는 것에 비하여 폴리실리콘의 intrinsic stress를 1/2로 줄일 수 있다는 것이 실험적으로 입증되어 있기 때문이다^[7]. 이 폴리실리콘은 microbridge를 형성하는 구조층으로 사용된다. 세번째 마스크를 사용하여 폴리실리콘에 구멍 패턴과 etching window 패턴을 형성한 후, RIE로 식각하였다. 구조층 폴리실리콘에는 thermal oxidation을 통하여 500 nm의 열산화막을 길러주는데 이는 구조층 폴리실리콘의 윗면과 옆면을 보호하는 역할을 한다. 네번째 마스크를 사용하여 etch window의 열산화막을 BHF (Buffered HF)로 선택적으로 식각하면 etch window에 희생층 폴리실리콘이 드러나게 된다. 그 후 photolithography 공정을 통하여 구멍 패턴과 실리콘 습식 식각 window를 형성하고 폴리실리콘을 건식 식각하였다. 그 다음 구조층 폴리실리콘의 윗부분을 보호하여 줄 산화막을 길러주고 패턴을 형성하여 실리콘 습식 식각 window의 산화막을 선택적으로 제거하면 이 부분의 희생층 폴리실리콘이 표면에 드러나게 되었다. 마지막으로 EDP(Ethylene-Diamine-Pyrocatechol) 수용액에서 실리콘을 습식 식각하면 그림 4에서 보여지는 바와 같이 벌크 실리콘과 희생층 폴리실리콘이 같이 식각이 되었다. 희생층 폴리실리콘이 모두 식각이 되면 microbridge가 형성되고 벌크 실리콘은 계속 식각이 진행되어 웨이퍼를 관통하여 그림 3의 (e)와 같은 동공(cavity)이 형성되었다. 즉 양면의 microbridge 사이로 전자빔이 통과할 수 있는 영역이 만들어지게 되었다. 이 공정은 식각 정지를 따로 필요로 하지 않는 장점이 있었다. 열산화막은 식각 동안에 microbridge를 감싸 주어 EDP 용액으로부터 보호해 주었다. 열산화막은 CVD 물질(산화막, 질화막)에 비하여 구조층의 높은 step에서 구조층을 잘 보호할 수 있었고 EDP 용액에서 실리콘과 큰 선택도(selectivity)를 가졌다. 4시간 정도 식각한 후, 열산화막을 BHF에서 제거하여 구조물을 완성하였는데 이에 대한 SEM 사진이 그림 5에 나타나 있다. 그림에서 검은 색으로 보이는 동공의 위에 microbridge 형태의 구조물이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있고, 이와 똑같은 구조가 웨이퍼 반대면에도 정렬된 채로 형성

되어 있었다. 동공은 anisotropic etching에 의하여 54.7° 의 각을 갖는다.

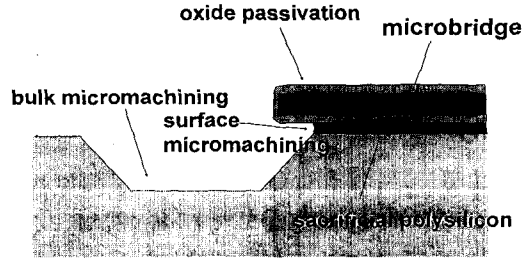


그림 4. 표면 마이크로머시닝과 벌크 마이크로머시닝의 혼합

Fig. 4. Mixing surface- and bulk- micromachining.



그림 5. SAM의 SEM 사진

Fig. 5. SEM image of SAM.

III. 마이크로렌즈 조립

SAM은 두 전극 구조인 경우는 양극 접합공정이 필요 없으나 세 전극 구조인 경우는 두 번의 양극 접합공정을 거쳐야 한다. 한번의 양극 접합은 SAM의 폴리실리콘과 glass를 접합하고 또 한번은 실리콘과 glass를 접합한다. 그림 6에 양극 접합의 개략도가 나타나 있다. 일반적인 방법으로 제작되는 세 전극구조의 마이크로렌즈^[6]는 네 번의 양극 접합을 수행하여야 하지만, SAM으로 제작된 마이크로렌즈는 두 번의 양극 접합만 수행하면 된다. 그림 7에 양극 접합을 수행한 SAM의 SEM 사진이 나타나 있다. SAM은 다층 양극 접합으로 제작한 마이크로렌즈에 비해 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 양극 접합공정을 줄임으로써 구멍간의 정렬이 용이할 뿐 아니라($5\mu\text{m}$ 이내),

제작도 간편해지고 array에 응용하기에도 유리하다. 그러나 이에 반해 전극간의 절연이 어렵고 여전히 양극 접합공정을 이용한다는 단점이 있어서 이를 해결하기 위한 연구가 현재 진행되고 있다.

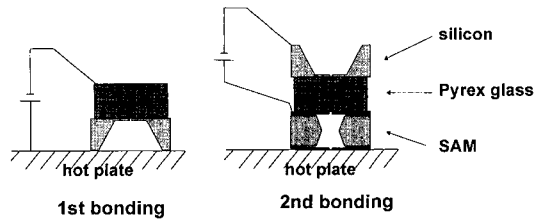


그림 6. 양극 접합의 개략도
Fig. 6. Schematic of anodic bonding.

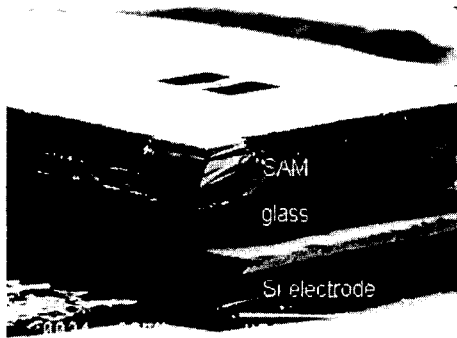


그림 7. 양극 접합으로 접합된 SAM의 SEM 사진
Fig. 7. SEM image of SAM bonded by anodic bonding.

양극 접합을 수행하기 전에 Pyrex glass에 전자빔이 통과할 수 있는 구멍 패턴을 만들기 위한 방법으로 EDM(Electrical Discharge Machining)^[8] 기술을 이용하였다. EDM기술은 공정이 간단하고 손상이 비교적 적어 마이크로렌즈를 제작하는 데 적합한 기술이다. 이는 방전에너지에 의해 발생한 고온의 열이 glass를 식각하는 원리를 이용한 것이다. 그림 8은 EDM 장치 개략도를 보여 주고 있다. 전해액은 NaOH 수용액을 사용하였으며 stainless needle과 Pt reference electrode를 사용하였다. EDM의 최적 조건을 잡기 위해 NaOH의 농도, 인가 전압, needle과 유리와의 거리를 변화시켜가며 실험하였다. 인가된 전압에 있어서는 30~40V이면 유리의 표면이 매우 양호하게 유지됨을 확인하였다. 수용액의 농도에 따라 서로 큰 차이는 없으나 30wt.%의 경우가 가장 양호한 결과를 보였고 또 이 농도에서는 수용액이 투명하여

실험이 용이하게 진행되는 장점이 있었다. 농도가 50wt.%에 달하면 수용액이 탁해서 식각되고 있는 유리를 육안으로 확인할 수 없기 때문에 식각 정지점을 제대로 결정하지 못하여 과도 식각의 가능성이 있었다. 또한 유리와 needle은 접촉해 있어야 빠르게 그리고 표면이 깨끗한 상태로 진행이 되었다. Needle을 용액에서 약간의 거리를 두면 방전되는 불꽃을 확인할 수 있었으나 표면 손상이 생길 확률이 크므로 후행될 양극 접합에 결정적인 타격을 입히게 된다. 유리 위에 얇은 박막의 상태로 수용액이 있어야 방전이 일어나고 너무 많은 수용액으로 needle이 잠기면 needle의 잠겨진 부분을 통하여 전류가 많이 전해질로 흐르기 때문에 needle의 침점에서 방전이 일어나는 양이 급격히 줄어든다. 30wt.%의 NaOH 수용액에서 40V의 전압으로 20초간 실험했을 때의 구멍의 모양이 그림 9에 나타나 있다. 구멍의 직경은 0.7mm이고 원래 크기를 50배 확대한 사진이다.

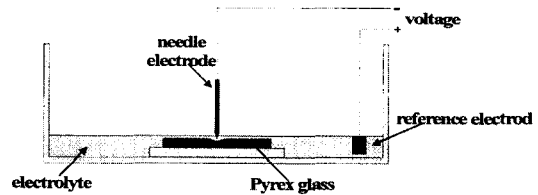


그림 8. EDM 개략도
Fig. 8. EDM schematic.

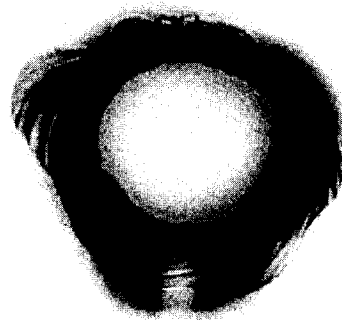


그림 9. EDM에 의해 식각된 유리 사진
Fig. 9. Photograph of glass etched by EDM.

IV. 결 론

집적화된 전자광학렌즈인 자기정렬렌즈를 표면 마이크로머시닝기술과 벌크 마이크로머시닝기술을 혼합하

여 제작하였고, 양극 접합과 EDM기술을 이용하여 조립하였다. 자기정렬렌즈는 신뢰도와 정렬 특성 등이 우수하고, lithography뿐만 아니라 mini-SEM, ion beam microcolumn, defect inspection 등에도 응용이 가능하리라 생각된다. 또한 웨이퍼에 multi-column을 집적화할 수 있는 가능성을 제시하므로 향후 column array를 위한 시발점이라고 할 수 있다.

Lithography에 적용하기 위한 multi-column의 사용은 전자빔묘화의 한계인 생산성을 급격히 증가시킬 수 있다. 웨이퍼를 노광(expose)하는데 걸리는 시간은 resist의 sensitivity와 beam current, 그리고 pattern coverage로서 계산된다. Resist의 sensitivity를 고려하지 않는다면 multi-column의 노광 시간은 column의 갯수를 늘이고 beam current가 클 수록 줄어들게 된다^[9]. 그러나, arrayed lithography를 위해서는 각 column 간의 균일한 특성과 독립적인 제어가 중요한 문제로 남게 된다. 이를 위하여 현재의 각 소자를 조립하는 방법에서 벗어나 웨이퍼 단위의 column 집적화가 요구되고 있다. 이는 전자원 텀 뿐만 아니라 각 렌즈의 전극들과 deflector까지 웨이퍼 단위로 접합하는 것이다. 제어부 IC를 함께 집적시킨다면 해상도를 증가시킬 수 있으면서 optical lithography에 상응하는 생산성을 기대할 수 있다.

감사의 글

※ 본 연구를 수행하는데 도움을 주신 서울대학교 반도체 공동 연구소의 직원분들께 감사를 드린다. 본 연구는 나노 프로젝트 연구 결과의 일환으로 (주) LG 반도체의 지원을 받아 수행되었다.

참고 문헌

- [1] J. Fricke, E. Obermeier, "An accelerometer made in a two-layer surface-machining technology" *Sensors and Actuators*, A 54, pp. 651-655, 1996.
- [2] Abraham P. Lee, Dino R. Ciarlo, Peter "A. Krulevitch, S. Lehew, J. Trevino, M. Allen Northrup, A practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and SMA actuation" *Sensors and Actuators*, A 54, pp. 755-759, 1996.
- [3] L. P. Muray, U. Staufer, E. Bassous, D. P. Kern and T. H. P. Chang, "Experimental evaluation of a scanning tunneling microscope-microlens system" *J. Vac. Sci. Technol.* B 9(6), pp. 2955-2961, Nov/Dec 1991.
- [4] T. H. P. Chang, D. P. Kern, L. P. Muray, "Arrayed miniature electron beam columns for high throughput sub 100nm lithography" *J. Vac. Sci. Technol.* B 10(6), pp. 2743-2748, Nov/Dec 1992.
- [5] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu and T. H. P. Chang, "Sub 40nm resolution 1keV scanning tunneling microscope field-emission microcolumn" *J. Vac. Sci. Technol.* B 12(6), pp. 3503-3507, Nov/Dec 1994.
- [6] K. Y. Lee, S. A. Rishton, and T. H. P. Chang, "High aspect ratio aligned multilayer microstructure fabrication" *J. Vac. Sci. Technol.* B 12(6), pp. 3425-3430, Nov/Dec 1994.
- [7] Dieter Maier-Schneider, Aylin Ersoy, Jürgen Maibach, Dieter Schneider and Ernst Obermeier, "Influence of annealing on elastic properties of LPCVD silicon nitride and LPCVD polysilicon" *Sensors and Materials* vol. 7, no. 2 pp. 121-129, 1995.
- [8] Shuichi Snon and Masayoshi Esashi, "Photoetching and electrochemical discharge drilling of Pyrex glass" *Technical Digest of the 9th Sensor Symposium*, 1990.
- [9] T. H. P. Chang, M. G. R. Thomson, E. Kratschmer, H. S. Kim, M. L. Yu, K. Y. Lee, S. A. Rishton, and B. W. Hussey, "Electron-beam microcolumns for lithography and related applications" *J. Vac. Sci. Technol.* B 14(6), pp. 3774-3781, Nov/Dec 1996.

— 저 자 소 개 —



李 龍 宰(正會員)

1970년 5월 23일생. 1994년 서울대학교 전자공학과 학사. 1996년 서울대학교 전자공학과 석사. 1996년 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학. 주관심분야는 실리콘 마이크로머시닝, 전자빔표화

全 國 鎮(正會員) 第 29卷 A編 第 5號 參照

1955년 3월 24일생. 1977년 서울대학교 전자공학과 학사. 1981년 University of Michigan 석사. 1986년 University of Michigan 박사. 1986년 ~ 1989년 워싱턴 주립대학 조교수. 1989년 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 부교수. 주관심분야는 실리콘 마이크로머시닝, 전자빔표화