

미세가공기술을 이용한 초소형 광픽업용 대면적 실리콘 미러 제작

박성준[#], 이성준*, 최석문*, 이상조**

Fabrication of the Large Area Silicon Mirror for Slim Optical Pickup Using Micromachining Technology

Sung-Jun Park[#], Sung-Jun Lee*, Seog-Moon Choi* and Sang-Jo Lee**

ABSTRACT

In this study, fabrication of the large area silicon mirror is accomplished by anisotropic wet etching using micromachining technology for implementation of integrated slim optical pickup and the process condition is also established for improving the mirror surface roughness. Until now, few results have been reported about the production of highly stepped 9.74° off-axis-cut silicon wafers using wet etching. In addition rough surface of the mirror is achieved in case of long etching time. Hence a novel method called magnetorheological finishing is applied to enhance the surface quality of the mirror plane. Finally, areal peak to valley surface roughness of mirror plane is reduced about 100nm in large area of mm² and it is applicable to optical pickup using infrared wavelength.

Key Words : Silicon mirror (실리콘 미러), Micromachining (미세가공), Optical pickup (광픽업), Anisotropic etching (비등방성 식각), Magnetorheological fluid (자기유변유체)

1. 서론

최근 저렴한 광 모듈 제작에 대한 요구가 늘어나면서 기존에 기계적인 방법으로 제작한 반사경을 조립하여 부품을 만들던 것에서 발전하여 현재는 소형화, 저가격을 실현하고 대량생산을 위하여 웨이퍼 단위에서 Si mirror mount를 직접 제작하려는 시도를 하고 있으며 일부 실시되고 있다. 광 저장장치는 매체의 배포성과 휴대성, 복사 방지 등에 있어서 타 저장장치와 차별되는 특성을 가지

고 있으므로 미래의 유비쿼터스 멀티미디어 정보 환경에서도 활용영역이 넓어질 것으로 예상되며 현재 여러 종류의 디지털 컨버전스 상품이 개발되고 있다. 또한 미래의 유비쿼터스 멀티미디어 정보환경을 위해서 광 정보 저장장치의 대용량화, 고속화와 더불어 소형화에 대한 요구가 더욱 커질 것은 분명하다.

이에 대한 핵심 기술로 작은 광 스폿을 가지며 경량이고 멀티헤드 픽업에 응용이 가능한 초소형화된 광픽업¹⁻³과 부품들의 설계 및 제작 기술

[#] 접수일: 2005년 5월 13일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

[#] 교신저자: 삼성전기 중앙연구소 eMD Lab.

E-mail sung-jun.park@samsung.com Tel. (031) 210-5528

* 삼성전기 중앙연구소 eMD Lab.

** 연세대학교 기계공학부

은 미래의 시장 확대를 위해서 필수적이다.

본 연구에서는 새롭게 제안된 집적형 광 픽업에서 핵심적인 광학계 요소인 대면적 미러를 MEMS 기술을 이용하여 최초로 실리콘 기판으로 제작하였으며, 미러의 표면을 개선하기 위한 식각 공정 조건과 후처리 공정기술을 확립하였다.

2. 연구목적 및 배경

본 연구에서 제작한 실리콘 대면적 미러가 적용되는 집적형 광 픽업의 구조를 살펴보면 Fig. 1 과 같다. 크게 렌즈 홀더, SiOB, 실리콘 미러부 3 개의 레이어로 구성되어 있다.

동작원리를 간단하게 살펴보면 LD로부터 발생된 광이 실리콘 미러에 반사되어 렌즈부(Objective Lens, HOE)를 통과하게 되고, 매체의 기록층에 초점을 맺게하여 기록 또는 재생하며, 매체로부터 반사된 광은 다시 렌즈를 통해 45° 실리콘 미러면으로 조사된 후 반대편 64.4° 실리콘 미러면에 상을 맺어 광검출기(PD)를 통해 수광된다. PD는 매체상에 기록된 비트의 패턴으로부터 RF 신호를 검출하여 신호처리 회로를 거쳐 정보를 재생함과 동시에, 집광된 광이 디스크 상의 초점심도 내에서 항상 초점이 맺히게 하기 위해 focus error 신호를 발생하며, 디스크 상의 정보가 기록된 track을 항상 추종할 수 있도록 tracking error 신호를 발생하는 역할을 한다.

이와 같이 LD로부터 발생한 광이 매체를 거쳐 다시 PD로 수광되어 데이터로 변환되기 위해서는 반드시 미러면을 거쳐야 하는데 매체로부터 반사된 광은 렌즈를 거쳐 대면적의 45° 미러면에 조사된다. 이 때 반사된 광은 전술한 바와 같이 미러면 전체에 조사된 후 반대편 미러면에 상을 맺게 되기 때문에 45° 미러면의 표면품질이 반사효율을 결정짓게된다. 따라서, 광소자의 최소출력을 결정하게되어 저전력 구동의 중요한 요인이 된다. 또한, 미러면의 품질에 의해 광산란이나 스캐터링 같은 문제가 발생하기 때문에 결상광학계의 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다.

실리콘 미러면을 광 픽업에 사용하기 위해서는 미러 표면에서 광산란과 손실을 고려하여 반사면 영역에서 $\lambda/6$ 의 표면거칠기를 가져야 하는 요구조건이 있다. 실리콘 (100) 웨이퍼를 비등방성 습식식각을 한 식각면의 표면거칠기는 에칭액의 중

류, 시간 및 농도와 같은 조건에 따라 다르지만 일반적으로 R_{rms} 5-100 nm의 값을 가지게 된다. 하지만, 제안된 광학계와 같은 45° 실리콘 미러면을 얻기 위해서는 9.74° off-axis-cut 된 웨이퍼를 사용해야 한다. 또한, 본 연구에서 제작한 대면적의 실리콘 미러를 얻기위해서 약 700 μm 깊이를 식각해야 하는데 수십시간의 식각 시간은 미러면의 표면 품질을 저하시키며 습식 식각 공정만으로는 요구되는 표면거칠기 수준을 만족시킬 수 없게 된다.

따라서, 본 연구에서는 새롭게 제안된 광학계를 제작하기 위해 비등방성 습식 식각 공정을 분석하고 최적의 조건을 도출하여 대면적 실리콘 미러를 제작하였다. 그리고, 습식 식각공정에 의해 제작된 미러면의 표면품질을 요구조건 수준으로 개선하기 위해 자기유변유체를 이용한 피니싱 공정을 도입하여 개선 정도를 파악하였다.

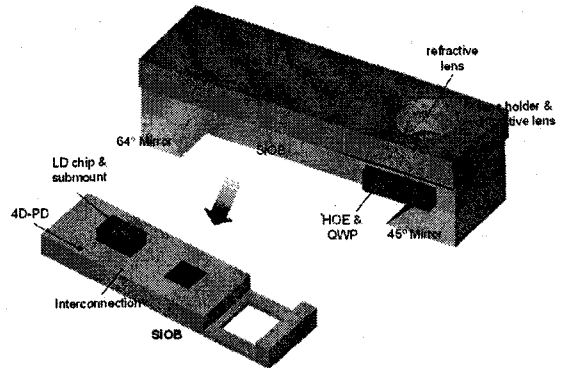


Fig. 1 Schematic view of integrated optical pickup

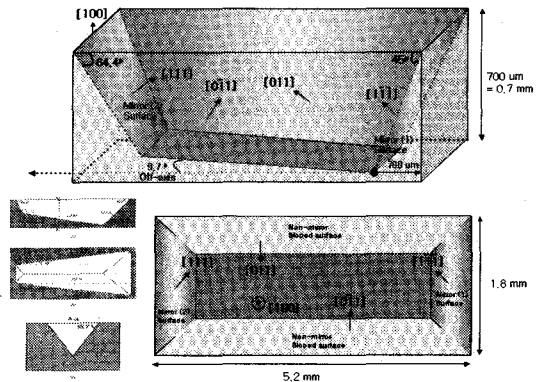


Fig. 2 Specifications of the mirror

3. 실리콘 미러 제작

3.1 습식 식각에 의한 실리콘 미러 제작

대면적 미러제작 공정은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 2단계로 나누어서 생각해 볼 수 있는데 첫번째는 실리콘 결정면을 찾기 위한 포토공정이고 두번째는 align key를 이용한 전반적인 식각 공정이다.

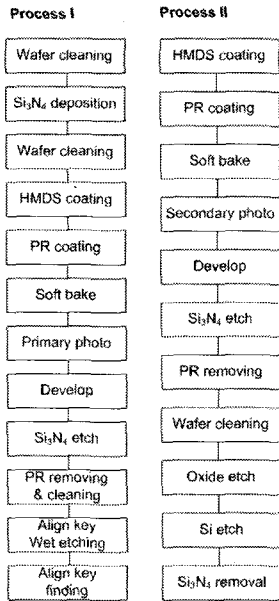


Fig. 3 Process flow

3.1.1 실리콘 결정면 찾기

기존의 (100) 실리콘 웨이퍼는 표면에 사각형의 패터닝 후 습식 식각시 <110>에 평행한 면이 54.74°의 각도로 형성된다. 따라서 기존의 (100) 웨이퍼로는 45° 경사면의 형성이 불가능하기 때문에 Czochralski (CZ)법으로 (100)방향으로 성장시킨 후 <011> 방향에서 9.74° 만큼 off-axis-cut한 웨이퍼를 사용하였다. 웨이퍼의 primary flat line을 이용하여 마스크 정렬을 한 후 포토공정 및 패터닝공정 후 식각한 결과 Fig. 4와 같이 미러 표면에 줄무늬와 불안정한 표면 형상이 관찰되었다. 이것은 정확한 정렬(<0.1°)이 되지 않은 상태에서 실리콘 웨이퍼의 결정면에 따라 식각했을 때 나오는 형상이다.⁴ 정확한 정렬을 위해서는 Fig. 5와 같은 pre-align 공정이 필요하다. 즉, 미러 식각 전에 기준위치 양

옆에 두 가지 형태의 패턴을 만든 후 식각을 한다. 원형 패턴에서 형성된 사각형을 광학 현미경으로 확인하면서 기준 패턴으로 정한 후 그 라인에서 동시에 만든 패턴을 align key로 사용하였다.

포토공정시 PR은 AZ1512를 사용하였고 패터닝은 RIE로 진행하였다.

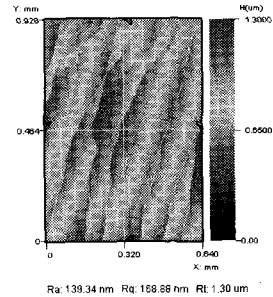
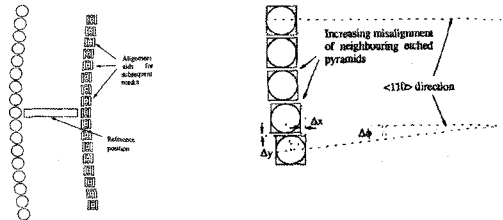
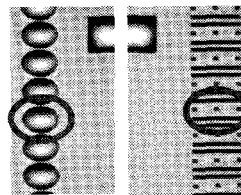


Fig. 4 Topographical image of Si surface after aligning on flat plane (R_a 139.3 nm, R_{p-v} 1.3 μ m)

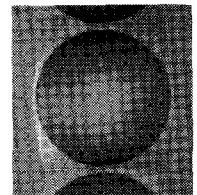


(a) Pre-align pattern shape

(b) Pattern finding



(c) Image of pattern after initial wet etching



(d) Image after finding align pattern (x100)

Fig. 5 Pre-align and pre-etching shape

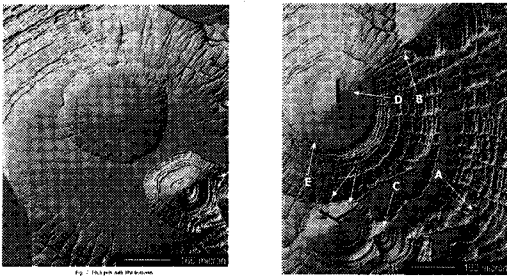
3.1.2 미러 식각공정

정확한 align key를 찾은 후 포토공정을 통하여 미러 식각을 위한 패터닝을 진행하였다. PR은 1단계 공정과 마찬가지로 AZ1512를 사용했고 황산-과수에서 10분간 세척을 진행하였다. 2차 포토공정으로 형성된 패턴을 마스크로 RIE를 이용하여 실리콘 질화막을 패터닝하였다.

미러 형성을 위한 식각은 circulation bath를 이용하였으며 식각 완료 후 실리콘 질화막 제거를 위해 웨이퍼 세척 후 85% H₂PO₃ 용액으로 280℃에서 약 1시간 dipping을 하였고, 잔존하는 실리콘 질화막의 제거 유무를 확인하였다.

3.2 제작결과 및 고찰

식각이 진행된 후의 미러면은 비등방성 식각 특성에 의한 etch stop으로 (111)면 방향을 가지게 되는데 (111)면은 다른 면에 비해서 많은 수의 defect를 가지게 된다.⁵⁻⁷ Fig. 6은 (111) 면에 생성된 pits와 dislocation을 보여주고 있다. 이러한 defect들은 표면의 파상도와 거칠기에 좋지 않은 영향을 끼치게 되어 원하는 미러면의 품질을 얻지 못하는 주요 원인이 된다



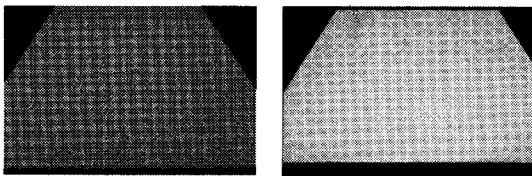
(a) Etch pits (b) Dislocation

Fig. 6 Defects generated on (111) plane⁸

3.2.1 용액 종류에 따른 비교

일반적으로 실리콘을 비등방성 습식식각하는 용액으로는 EPW, KOH⁹⁻¹⁰, TMAH¹¹ 등이 사용되고 있는데 본 연구에서는 두 가지의 용액으로 실리콘을 식각하여 표면 상태를 비교하였다. 그 결과의 일부를 Fig. 7에 나타내었다.

TMAH로 식각한 미러면은 전체적으로 pit가 다수 형성되어 있으며 KOH로 식각한 미러면이 상대적으로 깨끗한 것을 확인하였다.



(a) TMAH (b) KOH

Fig. 7 Images of the surfaces according to the etchant

3.2.2 KOH 농도에 따른 비교

KOH 용액의 농도변화에 따라 실리콘의 식각률이 변하게 되고, 용액 중에 포함될 수 있는 반응물들의 양도 바뀌기 때문에 용액의 농도에 따라 식각면의 상태가 크게 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 KOH 용액의 농도를 변화시켜 식각면의 상태를 비교하였다. 농도는 문헌상에서 실리콘 식각에 많이 사용되고 있는 30wt.%와 40wt.%를 비교하였으며 80℃에서 식각을 진행하였다.

KOH 용액 농도를 달리하여 식각한 후에 3차원 비접촉 광학식 측정기로 약 1mm×0.7mm의 영역을 측정된 결과를 살펴보면 30wt.%로 식각한 표면은 R_a 72nm인 반면, 40wt.%로 식각한 미러의 표면은 R_a 40nm대로 30wt.%일 경우보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

3.2.3 KOH 용액 온도에 따른 비교

식각용액의 농도와 함께 식각 특성에 중요한 영향을 미치는 인자가 용액의 온도이다. 용액의 온도는 농도와 함께 실리콘의 식각률을 결정하기 때문에 실리콘의 표면 상태를 결정하는데 절대적인 영향을 미친다.

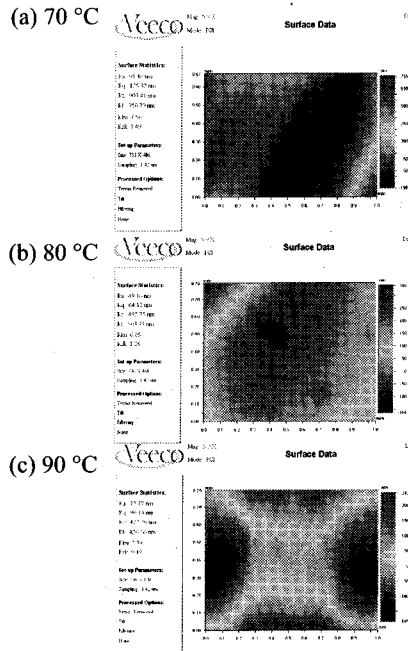


Fig. 8 Comparison between the mirror surfaces according to the temperature of etchant

실험결과를 통해 80°C 에서 식각한 미러 표면 (R_a 49.16nm)이 70°C (R_a 91.48nm)와 90°C (R_a 72.77nm)에서의 결과보다 우수한 것을 Fig. 8 과 같이 확인하였으며 이 결과는 온도에 대하여 상대적 인 최적조건이 존재한다는 것을 입증하고 있다.

3.2.4 웨이퍼 로딩 방법에 따른 비교

본 연구에서 구현한 식각 장치는 Fig. 9와 같다. 식각을 위한 etching bath는 용액의 온도를 위치별 로 균일하게 유지하기 위해서 뜨거워진 물이 bath 의 외곽 공간을 따라 순환할 수 있도록 입구와 출 구를 설치하였다. 안쪽에 채워져 있는 KOH용액을 지그를 사용하여 웨이퍼를 로딩한 후 식각하는 방 법을 사용하였다.

웨이퍼를 로딩하는 방향에 따라서 식각이 진 행됨에 따라 생성되는 cavity 내에서의 용액 및 반 응 생성물의 흐름에 차이가 발생하기 때문에 결과 적으로 식각된 실리콘 표면 상태에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 두 가 지 로딩 방식에 따른 식각 특성을 비교하였다.

측정 결과, 웨이퍼를 수평으로 로딩한 경우애 는 100-150nm 대의 R_q (rms value)값을 얻은 것에 비해서 수직방향으로 로딩한 경우에는 많이 개선 된 40-70nm 대의 값을 얻을 수 있었다. 이러한 결 과를 통해 웨이퍼의 로딩방법이 실리콘의 식각특 성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

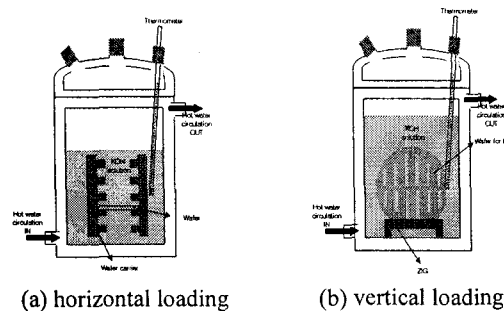


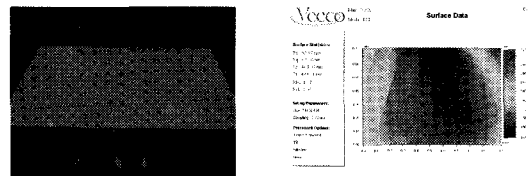
Fig. 9 An apparatus for anisotropic etching

3.2.5 마스크 종류에 따른 비교

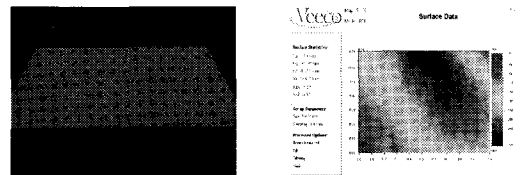
비등방성 습식 식각을 통하여 실리콘을 식각 할 때는 보통 수십 μm 이상의 두께를 식각하는 경 우가 대부분이기 때문에 PR을 식각 마스크로 사 용하는 것이 불가능하다. 본 연구에서도 700 μm 의 두께를 가지는 실리콘 웨이퍼를 관통하여 완전히

식각해야만 했기때문에 KOH와 같은 염기성 용액 에 식각이 거의 되지 않는 실리콘 질화막을 식각 마스크로 선정하여 실험을 수행하였다.

실리콘 질화막은 박막의 품질개선을 위하여 일반적으로 LPCVD를 이용, 700-800°C 정도의 온 도에서 증착이 되는데 증착 후에 온도가 내려가면 서 실리콘과의 열적 불일치(thermal mismatch)에 의 하여 실리콘 기판에 기계적인 응력을 발생시킨다. 이러한 기구로 발생하여 실리콘에 잔류하는 열응 력은 식각 후에 실리콘 표면특성에도 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 본 연구에서는 일반 실리콘 질화막(응력: ~1Gpa)과 응력이 수십 Mpa정도로 감 소된 저응력 실리콘 질화막을 사용하여 식각 특성 을 서로 비교하였다.



(a) Conventional Si₃N₄ (Ra : 52.97 nm)



(b) Low stress Si₃N₄ (Ra : 83.06 nm)

Fig. 10 Comparison between the mirror surfaces according to the etching mask

예상과는 다르게 Fig. 10 의 측정 결과에서 볼 수 있듯이 저응력 실리콘 질화막을 식각 마스크로 사용하여 식각한 미러의 표면거칠기가 오히려 20-30nm 정도 더 크게 나오는 결과를 얻었다. 이것은 저응력 실리콘 질화막을 웨이퍼에 증착하는 온도 가 일반 실리콘 질화막을 증착하는 온도보다 높기 때문에 실리콘과 실리콘 질화막 사이에 발생하는 기계적 응력보다는 증착 온도에 따라 실리콘 내부 에 형성된 SiO₂ 에 의한 stress fields 가 미러 표면의 pit 나 dislocation 을 형성하는데 있어서 더 큰 기여 를 했기 때문으로 생각된다.

4. MRF 공정

4.1 자기유변유체를 이용한 표면 연마 공정

실리콘 웨이퍼를 습식 식각을 할 경우 (100)면의 표면거칠기는 국부적인 영역에서 일반적으로 수 nm 이하의 값을 가지게 된다. 하지만, 본 연구에서 미러면으로 사용할 (111)면의 식각특성은 전절에서 고찰한 바와 같이 다른 면에 비해서 상대적으로 나쁘며 결함을 가질 가능성이 크다. 또한, 본 연구에서 사용한 700 μ m 두께의 웨이퍼를 식각하여 관통할 경우 식각 시간은 약 10 시간에 이른다. 장시간의 식각시간은 식각액에 노출된 미러면의 표면품위를 떨어뜨리게 되며, 실험결과 식각 후 측정된 (111)면의 표면거칠기는 mm² 이상의 대면적에서 R_{p-v} 200-400 nm 값을 가진다.

따라서, 습식식각 공정만으로 대면적 (111)면의 표면거칠기를 요구수준 이하로 향상시키는 것은 거의 불가능하기 때문에 MRF(Magneto-rheological Finishing) 공정을 도입하였다.¹² MRF는 인가된 자기장에 의해 점도가 변하는 기능성 유체인 자기유변유체에 연마 입자를 혼합하여 슬러리 형태로 대상 영역에 주입하고, 자기장의 세기를 조정하여 원형의 공구를 회전시킴으로써 발생하는 유동압(hydrodynamic pressure)을 이용하여 재료를 제거하는 공정이다. MRF공정의 개략적인 기구는 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)는 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이고, Fig. 11(b)에서는 magnetic chain의 형성과 연마입자 위치를 보여주고 있다. 자기장의 방향에 따라서 자성입자인 카르보닐기철은 체인구조를 형성하여 유연한 공구의 역할을 하며 연마입자들은 자기영동현상(magnetophoresis)과 중력에 의해 실리콘 표면에 위치하게 된다.

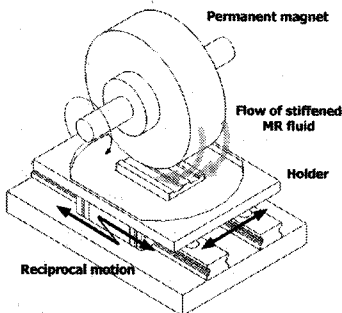


Fig. 11(a) Experimental setup

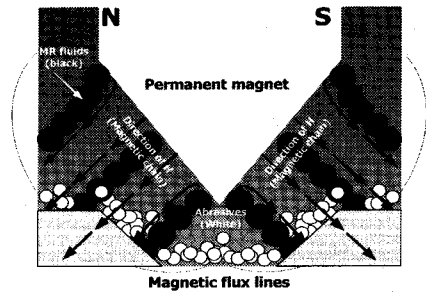


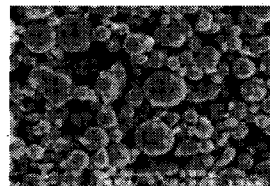
Fig. 11(b) Formation of magnetic chain

자기유변유체는 기본적으로 Fig. 12(a)에 나타낸 것처럼 평균입자크기 5 μ m 카르보닐기 철과 분산제로 구성되어 있으며 Fig. 12(b)과 같은 100nm 크기의 세리아(CeO₂) 나노입자를 적당한 비율로 자기유변유체와 혼합하여 연마 슬러리로 사용하였다.

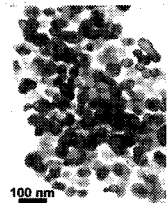
실험에 사용한 상세한 조건은 Table 1에 정리하였다. 공구와 실리콘 표면과의 간극은 수직방향으로 2mm이며, 공구의 회전속도는 500 rpm으로 고정하였다. 테이블의 왕복방향 이송속도는 100 mm/min로 일정하지만 공구의 회전방향에 따라 상대속도는 약간 틀려진다. 공구 끝단에서 자기장의 세기는 0.2 Tesla 이고, 입자간의 혼합비는 6:4이다.

Table 1 Experimental conditions

| | |
|----------------------------|----------------------------------|
| gap (mm) | 2 |
| table feed (mm/min) | 100 |
| rotation (rpm) | 500 |
| magnetic flux strength (T) | 0.2 |
| workpiece | silicon |
| abrasive | ceria 100nm alumina 1 μ m |



(a) Carbonyl iron powder



(b) Ceria powder

Fig. 12 Basic elements of MR fluid for Si finishing

4.2 표면품질 개선

연마입자로 사용한 세리아의 재료제거기구를 살펴보면 실리콘 웨이퍼 표면의 수화층(hydrated layer)과 화학적으로 결합 Ce-O-Si 본딩을 형성하여 실리콘 표면을 미세하게 뜯어내는 과정을 통해 표면거칠기를 개선하게 된다. 즉, 세리아 입자는 일반적으로 램핑에서 사용하는 세라믹이나 다이아몬드 파우더와 같이 기계적인 방법에 의해 스크래치를 생성하여 표면을 폴리싱하는 경질의 입자가 아니라 대상 표면과의 화학적 반응으로 재료를 제거하는 상대적으로 연한 재료이다. 이러한 내용을 도식적으로 Fig. 13에 나타내었다. 입자가 표면에 접촉하는 가공압력은 자기장의 세기로 결정되며, 그림에 표시된 연마입자의 운동은 공구의 회전으로 얻어진다.

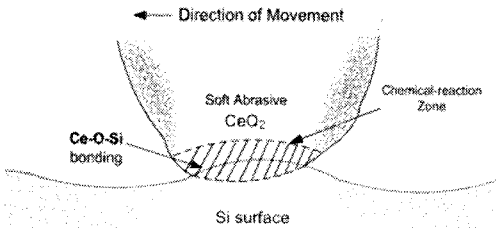


Fig. 13 Chemical reaction between ceria powder and Si

세리아 입자만을 혼합하여 MRF공정을 진행하게 되면 Fig. 14의 (B)영역으로 나타낸 표면 요철부 산과 골에 걸쳐서 전반적으로 균일하게 평탄화가 진행된다. 따라서 표면거칠기의 고주파 성분은 쉽게 제거가 되지만 peak 부분 요철을 제거하는 데는 한계가 있다. 따라서, (A)영역만을 선택적으로 제거하여 최대표면거칠기값을 빠르게 감소시키기 위해 평균입자크기 1 μ m의 알루미늄(Al_2O_3) 입자를 같이 혼합하여 사용하였다.

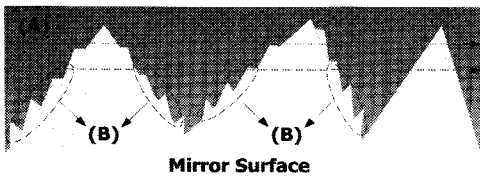
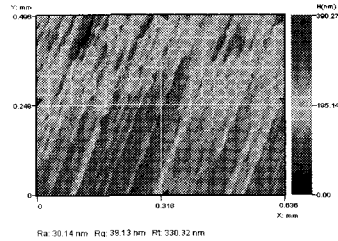
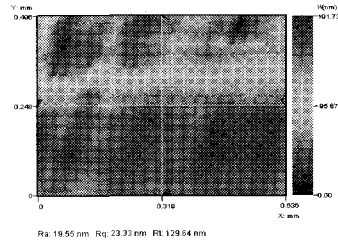


Fig. 14 Material removal mechanism

Fig. 15와 Fig. 16에 MRF 공정을 하기 전과 후의 미러 표면에 대한 측정 결과를 나타내었다. 식각 후의 거친 표면이 전체적으로 매끄러워지고 평탄화된 것을 쉽게 확인할 수 있다. 본 실험에서 MRF 공정을 한 후 습식 식각 공정을 마친 초기 표면 대비 약 40-60%의 표면 개선 효과를 얻을 수 있었으며 20-40nm대의 R_a 값을 10nm대로, 평균 200-300nm대의 R_{p-v} 값을 100nm대로 표면품질을 향상시켰다.

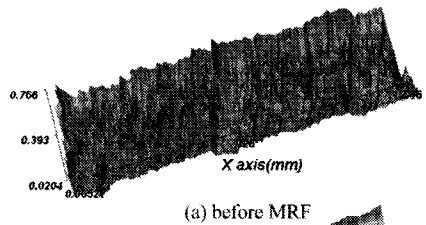


(a) before finishing (R_{p-v} 330.3nm)

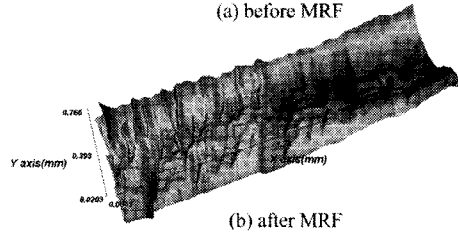


(b) after finishing (R_{p-v} 129.64nm)

Fig. 15 Comparison of the mirror surfaces



(a) before MRF



(b) after MRF

Fig. 16 Topographical image of mirror plane before and after magnetorheological finishing

5. 결론

본 연구에서는 제안된 초소형 집적형 광 픽업에서 광을 전달하는 핵심 광학계인 대면적 미러를 최초로 실리콘 기판으로 구현하고, 표면품위를 개선하기 위한 최적 식각조건과 표면 처리 공정을 확립하였다. LD, PD, lens 부와의 집적화를 위하여 미러는 700 μm 두께의 실리콘 기판을 이용, 비등방성 습식 식각을 통하여 45° 와 64.4°의 경사각을 갖도록 제작되었으며 식각 용액으로는 식각률이 우수하고, 농도의 조절이 용이한 KOH 수용액을 사용하였다. 적합한 식각 조건을 설정하기 위하여 공정 변수로 KOH 용액의 농도, 온도, 식각 마스크, 웨이퍼 로딩방법, 웨이퍼의 종류 등을 선택하였고, 기초실험을 통하여 조건들을 비교한 후 선정된 최적 조건으로 본 실험을 진행하였다.

식각 실험 결과 mm² 이상의 대면적 영역에서 평균 200nm대의 R_{p-v} 값을 얻었으며 국부적인 영역에서는 50nm의 결과를 얻을 수 있었다. 미러면의 광학적 요구조건을 만족시키기 위해 습식 식각 공정으로 제작된 미러에 MRF공정으로 표면품위 향상을 시켰으며 광 픽업에서 사용되는 빔의 면적을 고려한 mm²의 대면적 영역에서 평균 100nm대의 R_{p-v} 를 가지는 미러면을 얻을 수 있었다. 이는 600nm대의 적외선 파장을 사용하는 광 픽업의 미러로서 충분히 적용 가능한 결과이다.

향후 off-axis 웨이퍼의 제작 과정에서 첨가되는 불순물의 조절이나 신뢰성 있는 결정방향 정렬 방법의 개발 및 전용 습식 식각 장치의 구현 등이 뒤따른다면 추가적인 표면 거칠기의 개선이 이루어질 것으로 보이며 공정의 용이성과 저가격 등의 장점을 고려한다면 실리콘을 대면적 미러로 사용하는 집적형 광 픽업에 대한 응용가능성은 더욱 증가할 것으로 예상된다.

참고문헌

- Manoh, K., Shikida, M., Yamashiro, T., "Small Integrated Optical Head Device using a Blue-Violet Laser Diode for Blu-ray Disc System," Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42, pp.880-884, 2003.
- Nemoto, K., Honda, K., "Integrated Optical Devices for Optical Disk Applications," IEICE Trans. Electron., Vol.E85-C, No.4, pp. 1001-1008, 2000.
- Maeda, T., Terao, M., Shimano, T., "A Review of Optical Disk Systems with Blue-Violet Laser Pickups," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42, pp.1044-1051, 2003.
- Ensell, G., "Alignment of Mask Patterns to Crystal Orientation," Sensors and actuators A 53, pp.345-348, 1996.
- Merveille, C., "Surface Quality of {111} Side-walls in KOH-etched Cavities," Sensors and Actuators A, Vol. 60, pp. 244-248, 1997.
- Holke, A., Henderson, H. T., "Ultra-deep Anisotropic Etching of (110) Silicon," J. Micromech. Microeng. Vol. 9, pp.51-57, 1999.
- Nijdam, A. J., Berenschot, J. W., Suchtelen, J., Gardeniers, J. and Elwenspoek, M., "Velocity Sources as an Explanation for Experimentally Observed Variations in Si {111} Etch Rates," J. Micromech. Microeng., Vol. 9, pp.135-138, 1999.
- Nijdam, A. J., Gardeniers, J., Gui, C. and Elwenspoek, M., "Etching Pits and Dislocations in Si (111)," Sensors and Actuators 86, pp.238-247, 2000.
- Veenendaal, E., Sato, K., Shikida, M. and Suchtelen, J., "Micromorphology of Single Crystalline Silicon Surfaces during Anisotropic Wet Chemical Etching in KOH and TMAH," Sensors and Actuators A 93, pp.219-231, 2001.
- Sato, K., Shikida, M., Yamashiro, T., Tsunekawa, M. and Ito, S., "Roughening of Single-crystal Silicon Surface Etched by KOH Water Solution," Sensors and Actuators, Vol. 73, pp.122-130, 1999.
- Shikida, M., Masuda, T., Uchikawa, D. and Sato, K., "Surface Roughness of Single-crystal Silicon Etched by TMAH Solution," Sensors and Actuators A 90, pp.223-231, 2001.
- Park, S. J., Ahn, B. W., Lee, S. J., "Nano-scale Precision Polishing Characteristics using Micro Quill and Magnetic Chain Structure," Journal of KSPE, Vol. 21, No. 8, pp.34-42, 2004.