

## 집적형 광 픽업용 대면적 실리콘 미러 제작

### Fabrication of Large Area Silicon Mirror for Integrated Optical Pickup

김해성<sup>†</sup>, 이명복, 손진승, 서성동, 조은형

Hae-Sung Kim, Myung-Bok Lee, Jin-Seung Sohn, Sung-Dong Suh, and Eun-Hyoung Cho

#### Abstract

A large area micro mirror is an optical element that functions as changing an optical path by reflection in integrated optical system. We fabricated the large area silicon mirror by anisotropic etching using MEMS for implementation of integrated optical pickup. In this work, we report the optimum conditions to better fabricate and design, greatly improve mirror surface quality. To obtain mirror surface of 45°, 9.74° off-axis silicon wafer from (100) plane was used in etching condition of 80°C with 40wt.% KOH solution. After wet etching, polishing process by MR fluid was applied to mirror surface for reduction of roughness. In the next step, after polymer coating on the polished Si wafer, the Si mirror was fabricated by UV curing using a trapezoid bar-type array structure. Finally, we obtained peak to valley roughness about 50 nm in large area of mm<sup>2</sup> and it is applicable to optical pickup using blue-ray wavelength as well as infrared wavelength.

**Key Words :** Silicon Mirror (실리콘 미러), Optical Pickup (광 픽업), Etching(식각), MR Fluid (자기유변유체), Polymer-clad Silicon Mirror (폴리머를 입힌 실리콘 미러)

#### 1. 서론

광 저장 장치란 기록 매체에 빛으로 정보를 기록하는 장치를 말한다. 이러한 광 저장 장치는 매체의 배포성과 휴대성, 저렴한 용량 추가, contents 복사 방지 등에 있어서 타 저장 장치와는 차별되는 특성을 가지고 있으므로 미래의 멀티미디어 정보 환경에서도 광 저장 장치의 활용 영역이 넓어질 것으로 예상된다. 현재 여러종류의 digital convergence 상품이 개발되고 있으며 digital 방송 확대에 따른 AV용 기록 장치의 수요 확대, 휴대용 AV 및 정보 저장 장치의 수요 확대에 따라 향후 그 수요는 지속적으로 높아질 것으로 예상된다. 또한 미래의 멀티미디어 정보 환경을 위해서는 광 정보저장장치의 대응량화, 고속화와 더불어 소형화에 대한 요구가 더욱 커질 것은 분명하다.

이에 대한 핵심 기술로 작은 광 spot을 가지며

경량이고 multi-head 광 픽업 (optical pick-up)으로의 응용성[2-4]과 그 element들의 설계 및 제작 기술은 미래의 시장 확대를 위해서는 필수적이다. 이러한 element들을 작은 공간에 효율적으로 집적화 한다면 초소형화는 물론 원가 경쟁력, 품질의 안정성이 확보될 수 있다.

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

#### 2. 미러 제작

##### 2.1 연구 목적 및 이론적 배경

차세대 초소형 광 정보 저장기기의 개발 필요성이 증대되면서 SFF ODD (small form factor optical disk drive)를 구현하기 위해 요구되는 핵심 제작 기술 중 하나가 광 픽업 구현 기술이다. 광 픽업 구성 요소 중 빛의 광 경로를 제어해 주는 대면적 마이크로 미러는 광 저장 장치의 핵심 부품이다. 일반적으로 이러한 마이크로 미러는 고정밀 표면을 요하기 때문에 제작에 있어서 높은 품질과 신뢰성을 기대하기는 쉽지 않다. 특히

<sup>†</sup> 삼성종합기술원 Nano Device Lab

E-mail : haesung74.kim@samsung.com

논문접수일 (2005년 4월 6일)

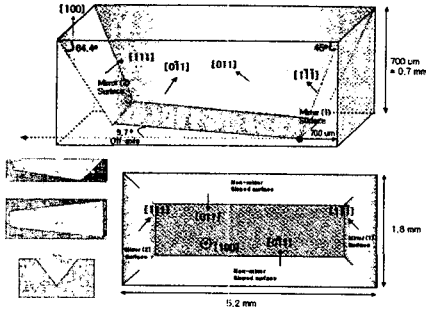


Fig. 1 A theoretical picture of a completed v-groove defined by {111} planes on  $9.7^\circ$  off-axis cut (100) silicon

SFF 광 픽업의 마이크로 미러의 경우 약  $700\ \mu\text{m}$ 의 미소 부품 두께가 요구되고 동시에 수십 나노 수준의 초고정밀 표면 정도를 만족시켜야 하므로 실리콘 기판에 대한 습식 식각 공정과 이후 후속 공정을 통하여 요구 조건을 만족시키고자 한다. 먼저 이러한 미러는 실리콘 웨이퍼의 비등방성 식각 특성을 이용하여 구현하도록 설계되었다. 그림 1와 같이 한쪽 면이  $45^\circ$ , 다른 쪽 면이  $64.48^\circ$ 의 경사를 가지게 된다[1]. 실리콘 미러 면을 광 픽업에 사용하기 위해서는 미러 표면에서 광의 산란과 손실 등을 고려하여 미러면이 가져야 할 요구 조건이 있는데 그림 2의 박스 안에 표시된 수식은 픽업에 사용되는 미러의 표면 특성을 시뮬레이션을 통하여 추정한 결과이다. 미러 표면의 p-v value가 광 픽업에서 사용하는 광 파장의 1/6 정도 되어야 하고, RMS 값은 이 값을 3.5로 나눈 크기의 값이 되어야 픽업에서 사용할 수 있는 미러 면의 특성을 갖추게 된다.

MEMS 기술을 이용한 실리콘 기판의 비 등방성 식각을 통하여 미러면을 형성할 때 영향을 줄 수 있는 요인들에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 웨이퍼의 종류와 식각 조건 (식각 용액의 농도, 온도, 식각 방법 등)을 바꿔가면서 실리콘 미러의 표면 특성을 평가하였다. 그리고, 식각 후

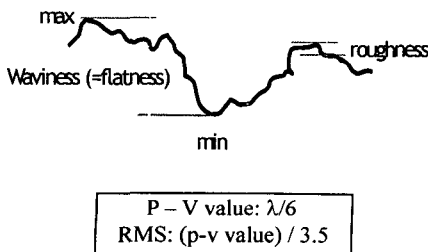


Fig. 2 Optical requirement of mirror surface for optical pick-up

표면 개선을 위한 첫 번째 후처리 공정으로 MRF 공정을 적용하여 표면 변화를 관찰하였다.

## 2.2 습식 식각에 의한 실리콘 미러 제작

본 연구에서 제작을 수행한 대면적 미러 제작 공정 flow는 1, 2 단계로 나누어서 생각해 볼 수 있는데 1 단계는 실리콘 결정면을 찾기 위한 photo 공정이고 2 단계는 align key를 이용한 전반적인 식각 공정이다.

### 2.2.1 실리콘 결정면 찾기(Align key 공정)

기존의 (100) 실리콘 웨이퍼는 표면에 사각형의 patterning 후 습식 식각시  $\langle 110 \rangle$ 에 평행한 면이  $54.74^\circ$ 의 각도로 형성된다. 따라서 기존의 (100) 웨이퍼로는  $45^\circ$  경사면의 형성이 불가능하다. 본 연구에서 적용한 웨이퍼의 특징은 Czochralski (CZ)법 또는 Floating Zone (FZ)법으로 (100) 방향으로 성장시킨 후  $\langle 011 \rangle$  방향에서  $9.74^\circ$ 만큼 off-axis cut한 것이다.

웨이퍼의 primary flat line을 이용하여 mask align을 한 후 photo 공정 및 patterning 공정 후 식각한 결과 그림 3과 같이 미러 표면의 줄무늬와 불안정한 표면 형상을 가지게 되었다. 이것은 정확한 ( $<0.1^\circ$ ) align이 되지 않은 상태에서 실리콘 웨이퍼의 결정면에 따라 식각했을 때 나오는 형상이다[5]. 정확한 align을 위해서 그림 4와 같은 pre-align 공정이 필요하다. 즉, 미러 식각 전에 그림에서 보듯이 기준 위치에서 양 옆에 두 가지 형태의 pattern을 만든 후 식각을 한다. 원형 pattern에서 형성된 사각형을 광학 현미경으로 확인하면서 적은 간격과 틀어짐을 보고 기준 pattern로 정한 후 그 라인에서 동시에 만든 pattern을 align key로 사용하였다.

실험 진행은 먼저 LPCVD를 이용하여 실리콘 질화막을  $870^\circ\text{C}$ 에서  $1500\ \text{\AA}$  증착하였으며 photo 공정 시 PR은 AZ1512를 사용하였고 patterning은 RIE로 식각하였다. align key를 찾기 위한 식각 공정은 circular bath 장비를 통하여 KOH(J.T. Baker, 87.8%)로  $80^\circ\text{C}$ 에서 25분간 수행한 후 광학 현미

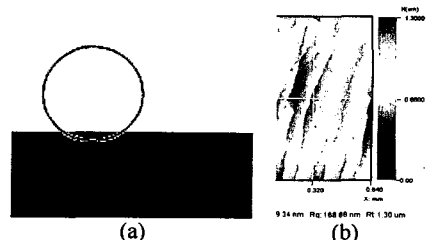


Fig. 3 Etch results after aligned according to flat zone. (a) Optical microscopic image after etched. (b) Nanoscan image for (a) region

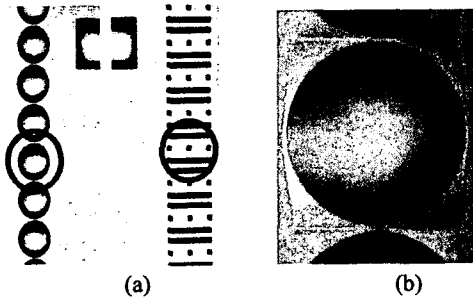


Fig. 4 Optical microscopic images for pre-align and pre-etching. (a) Image after initial etching. (b) Magnified image (x100) after identified pre-aligned pattern by etching in KOH 40wt% solution in 80°C

경으로 그림 5 와 같은 절차를 거쳐서 정확한 align key 를 찾을 수 있었다.

### 2.2.2 대면적 미러 식각 공정

1 단계 공정을 통하여 정확한 align key 를 찾은 후 그 면에 바로 2 차 photo 공정을 통하여 미러 식각을 위한 patterning 을 진행하였다. PR 은 1 단계 공정과 마찬가지로 AZ1512 를 사용하였고 황산-과수에서 10 분간 cleaning 을 진행하였다. 2 차 photo 공정으로 형성된 pattern 을 마스크로 RIE 를 이용하여 실리콘 질화막을 patterning 하였다.

미러 형성을 위한 식각은 circulation bath 를 이용하여 진행하였으며 식각 완료 후 실리콘 질화 막 제거를 위해 웨이퍼 cleaning 후 85%, H<sub>2</sub>PO<sub>3</sub> 용액으로 280°C에서 1 시간 정도 dipping 을 하였고, Nanospec 으로 잔존하는 실리콘 질화막의 제거 유무를 확인하였다. 표면 평가는 nanoscan 이 라는 interferometer 를 이용한 미세 표면 3 차원 측정기로 수행하였다. 640 μm x 480 μm 정도의 범위로 우리가 원하는 면적을 여러 장 찍어서 정합하는 방식을 이용하였다.

### 2.3 자기유변유체를 이용한 표면 연마 공정

식각으로 형성된 미러면의 표면 거칠기를 더 개선하기 위하여 MRF(Magnetorehological Finishing) 공정을 수행하였다. MRF 는 자기장에 반응을 하는 유체인 MR fluid 를 미세한 연마 입자와 혼합하여 대상 영역에 주입하고 자기장의 세기를 조정하여 원형의 공구를 회전시킴으로써 발생하는 Hydrodynamic pressure 로 표면을 연마하는 공정이다. MRF 공정에 의한 표면 연마 메커니즘은 그림 5 과 같다.

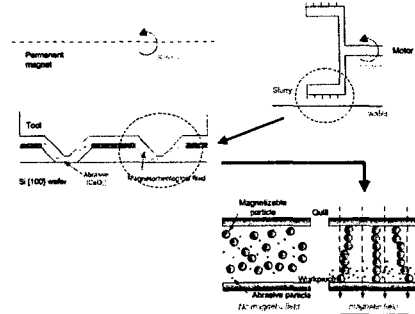


Fig. 5 Mechanism of surface polishing for MRF process

### 2.4 폴리머를 입힌 실리콘 미러

MRF 공정을 통하여 가공된 실리콘 웨이퍼를 청색 레이저 광원의 픽업에 사용 가능한 미러로 제작하기 위해 한번 더 폴리머를 도포하는 가공으로 미러의 표면 정밀도를 높이도록 하였다. 이를 통해 polymer-clad Si 미러 어레이를 제작하였다. 그림 6 은 polymer-clad Si 미러의 제작 공정 순서를 나타낸다. 먼저 앞서 이루어진 식각 공정과 MRF 공정 이후 준비된 실리콘 웨이퍼 위에 액체 상태의 UV 경화성 polymer 를 식각이 된 cavity 의 빗면에 일정량 떨어뜨린다 (그림 6(b)). 그 후에 사각형 폴 bar 형태의 초정밀 미러 표면을 갖는

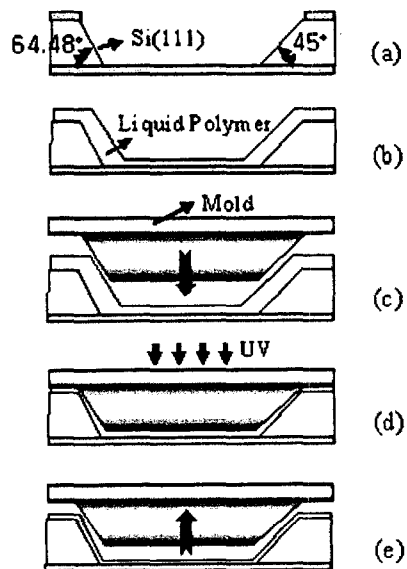


Fig. 6 Fabrication sequence of micro-mirror array. (a) Si wet etching, (b) Dispense of liquid polymer, (c) Pressing with mold, (d) UV irradiation, (e) Demolding

어레이 (array) 형태의 구조물을 투명한 기판 위에 접합시켜 금형을 제작한다. 이렇게 준비된 금형을 이용하여 polymer 를 압착하고 UV 를 조사한다 (그림 6(c), (d)). Polymer 가 경화된 후에 금형을 Si wafer 로부터 분리하면 식각된 Si wafer 위에 얇은 polymer 가 clad 된 형태의 마이크로 미러가 얻어진다 (그림 6(e)). 금형을 제작하는 방법은, 크기 및 형상이 식각된 Si 에 대응하도록 사다리꼴의 단면 및 45°와 64.48°의 미러 면을 갖는 긴 막대 형태의 초정밀 연마 가공된 BK7 재질의 미러를 준비하고, 이를 미러 가이드 패턴이 형성되어 있는 Pyrex 기판 위에 UV 접착제를 사용하여 접합하였다. Pyrex 기판의 전면에 막대 형태의 미러를 여러 개 접합함으로써 wafer level 의 마이크로 미러 어레이의 제작이 가능하다. Si 기판 위에 clad 되는 polymer 와 Si 간의 접착력을 좋게 하기 위해 Si 기판에 adhesion 향상 처리를 하였고, 반대로 금형은 UV 경화 후에 polymer 와 잘 분리되도록 하기 위하여 anti-adhesion 처리를 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 식각 용액 종류에 따른 비교

일반적으로 실리콘을 비 등방성 습식 식각하는 용액으로는 EPW, KOH[6-7], TMAH[8]등이 사용되고 있는데 이 중에서 EPW 는 가장 유독하기 때문에 최근에는 거의 사용을 하지 않고 있으며 KOH 와 TMAH 가 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 두 가지의 용액으로 실리콘을 식각하여 표면 상태를 비교하였다.

그림 7(a),(b)는 각각 TMAH 와 KOH 를 이용하여 식각한 미러의 표면 상태를 보여주고 있는데 광학 사진에서 볼 수 있듯이 TMAH 로 식각한 미러면은 전체적으로 pit 가 다수 형성되어 있는 것을 확인할 수 있으며 KOH 로 식각한 미러 면이 상대적으로 깨끗한 것을 알 수 있다.

#### 3.2 KOH 용액의 농도에 따른 비교

KOH 용액의 농도 변화에 따라 실리콘의 식각률이 변하게 되고, 용액 중에 포함될 수 있는 반응물들의 양도 바뀌기 때문에 식각면의 상태가 크게 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 KOH 용액의 농도를 변화시켜서 식각 면의 상태를 비교하였다. 농도는 문헌상에서 실리콘 식각에 많이 사용되고 있는 30wt.%와 40wt.%를 비교하였으며 온도는 80°C 에서 식각을 진행하였다.

그림 8 은 KOH 용액의 농도를 다르게 해서 식

각한 후에 관찰한 미러의 표면 사진을 보여주고 있으며 3 차원 측정기로 1mm×0.8mm 의 영역을 측정한 결과를 살펴보면 30wt.%로 식각한 표면은 Ra(중심선 평균 거칠기)가 72nm 인 반면, 40wt.%로 식각한 미러의 표면은 Ra 가 40nm 대로 30wt.%일 경우보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

#### 3.3 KOH 용액 온도에 따른 비교

KOH 용액의 농도와 함께 식각 특성에 중요한 영향을 미치는 파라미터가 용액의 온도이다. 용액

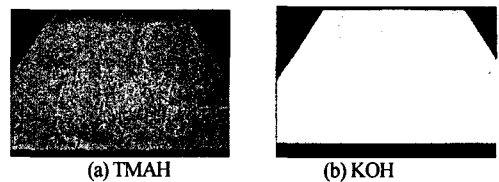


Fig. 7 Optical microscopic images according to type of etching solution

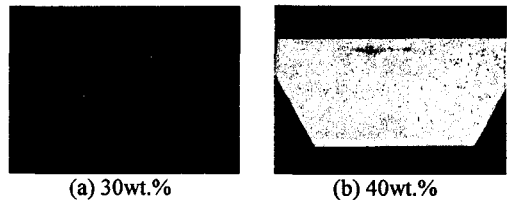


Fig. 8 Status of mirror surface according to variation of concentration in KOH solution

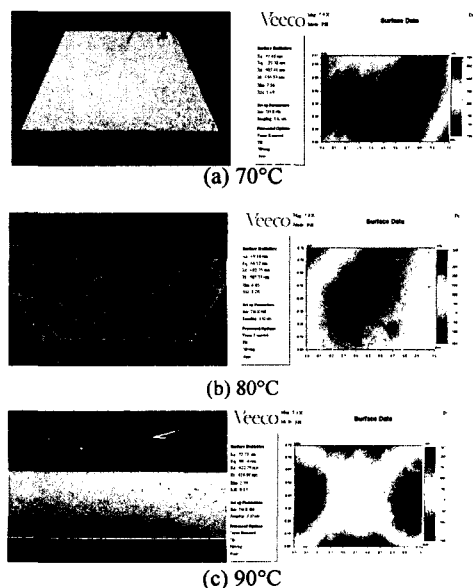
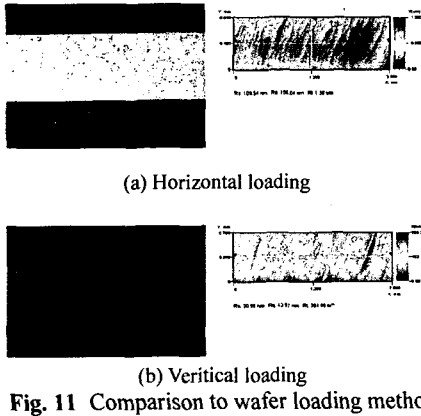
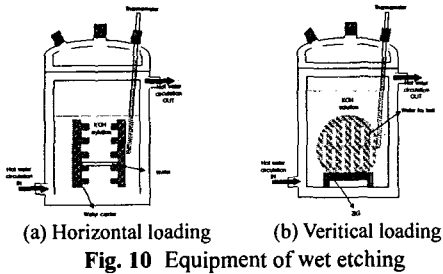


Fig. 9 Status of mirror surface according to variation of temperature in KOH 40wt.% solution

의 온도는 농도와 함께 실리콘의 식각률을 결정하기 때문에 실리콘의 표면 상태를 결정하는데 절대적인 영향을 미친다.

그림 9는 40wt.%의 KOH 용액을 70°C 부터 90°C 까지 10 도씩 온도를 변화시키면서 700um 두께의 9.74 도 off-axis 실리콘 웨이퍼를 식각한 후 관찰한 45 도 미러면의 표면 사진과 측정 결과들이다. 80°C 에서 식각한 미러의 표면 (Ra: 49.16 nm)이 70°C (Ra: 91.48 nm)와 90°C (Ra: 72.77 nm)에서의 결과보다 우수한 것을 알 수 있으며 이는 온도에 대하여 상대적인 최적 조건이 존재한다는 것을 입증하고 있다.



3.4 웨이퍼 loading 방법에 따른 비교

본 연구에서 웨이퍼 식각을 수행하기 위해 구현한 식각 장치는 그림 10 과 같다. circulation bath는 용액의 온도를 위치 별로 균일하게 유지하기 위해서 뜨거워진 물을 reactor 의 외곽 공간을 따라 흘리는데 사용되었다. 웨이퍼를 loading 하는 방법에 따라서 식각이 진행됨에 따라 생성되는 cavity 내에서의 용액 및 반응 생성물의 흐름에 차이가 발생하기 때문에 결과적으로 식각된 실리콘 의 표면 상태에 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 그림 10 의 (a), (b)와 같이 웨이퍼를 수평으로 loading 하는 것과 수직으로 loading 하는 두 가지

방식의 식각 특성을 비교하였다. 측정 결과, 그림 11 에서 볼 수 있듯이 웨이퍼를 수평으로 loading 했을 경우에는 100~150nm 대의 Rq (RMS value)값을 나타낸 것에 비하여 수직으로 loading 했을 경우에는 이보다 많이 개선된 80~100 nm 대의 값을 얻을 수 있었다. 결과로부터 웨이퍼의 loading 방법이 etching mechanism 에 큰 영향을 주었다는 것을 확인할 수 있었다.

3.5 에칭 실험을 통한 미러 표면의 특성

전술한 실험 결과들을 바탕으로 본 연구에서 최적의 조건으로 나타난 9.74 도 off-axis 실리콘 웨이퍼의 식각 조건은 40wt.%의 KOH 로 80°C 의 온도에서 웨이퍼를 수직 방향으로 loading 하여 식각하는 방식이다. 웨이퍼는 Virginia Semiconductor 사에서 제조된 것을 사용하였으며 상기의 조건으로 제작한 실리콘 미러의 표면 측정 결과는 그림 12 와 같다. 그림 12 의 (a)는 제작된 실리콘 미러의 경사각을 알아보기 위하여 미러의 단면을 cutting 한 후 광학 현미경으로 관찰한 결과이며 미러가 45 도의 경사를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. (b)는 이렇게 형성된 실리콘 미러의 (0.78 × 0.79) mm<sup>2</sup> 영역에서 관찰한 표면 특성을 보여주고 있는데 12.54nm, 90.85nm 의 Ra 와 Rt (최대 단면 높이) 값을 얻을 수 있었다. 이것은 웨이퍼 내의 여러 미러 중에서 가장 좋은 부분을 관찰한 결과이고, 평균적으로는 200nm 대의 Rt 값을 얻을 수 있었으며 표면 거칠기를 더 줄이기 위해서 완성된 미러에 MRF 공정을 적용하였다.

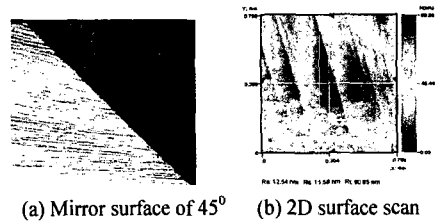


Fig. 12 Silicon mirror of large area inclined plane

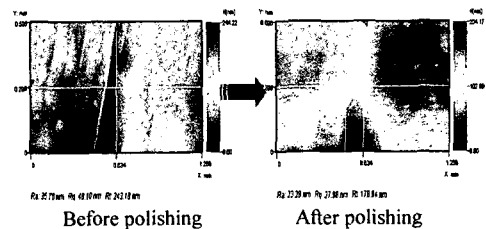


Fig. 13 Surface polishing using MRF process

### 3.6 식각 공정 이후의 후속 공정

이방성 (비등방성) 식각 공정 후, 미러의 표면 거칠기를 향상 시키기 위해 완성된 미러에 MRF 공정을 적용하였으며, 그 이후 polymer clad Si 미러 어레이를 통하여 미러의 표면 거칠기를 더 줄일 수 있었다. 그림 13 은 MRF 공정 전, 후의 미러 면에 대한 3 차원 측정 결과를 보여주고 있다. MRF 공정을 한 이후에 약 30~50 %의 표면 개선 효과를 얻을 수 있었다. 또한 MRF 공정 후 폴리머 도포와 UV curing 공정을 통하여 실시한 polymer clad 실리콘 미러의 표면 거칠기 측정 결과는 약 58 nm 이다. (그 결과에 대한 측정 그림은 여기에 제시하지 않았다.)

## 4. 결론

본 연구에서는 새롭게 제안된 초소형 집적형 광 픽업에서 광을 전달하는 핵심 광학제인 대면적 미러를 최초로 실리콘 기판으로 구현하고, 표면 특성을 개선하기 위한 식각 조건과 표면 처리 공정, 표면 보상 처리 공정 등을 확립하였다. LD, PD, lens 부와의 집적화를 위하여 미러는 700um 두께의 실리콘 기판을 이용, 비등방성 습식 식각을 통하여 45 도와 64.4 도의 경사각을 갖도록 제작되었으며 식각 용액으로는 식각률이 우수하고, 농도의 조절이 용이한 KOH 수용액을 사용하였다. 적합한 식각 조건을 얻어내기 위하여 공정 변수로 KOH 용액의 농도, 온도, 식각 마스크, 웨이퍼 loading 방법, 웨이퍼의 종류 등을 선택하였고, 기초 실험을 통하여 조건들을 비교한 후 선정된 최적 조건으로 본 실험을 진행하였다. 본 실험은 CZ 법으로 제작된 9.74° off-axis 웨이퍼에 1500Å의 실리콘 질화막을 식각 마스크로 증착하여 수직방향으로 40wt.%의 KOH 용액에 loading 하고, 80°C에서 10 시간 동안 식각을 진행하였다. 실험 결과 평균 200nm 대의 Rt 값을 얻었으며, 이후 MRF 후속 공정과 폴리머 cladding 실리콘 표면 보상 처리 공정을 통하여 약 58 nm의 표면 형상 정밀도 값을 얻을 수 있었다. 이는 600nm 대의 적외선 파장을 사용하는 광 픽업뿐만 아니라 청색 광원의 광 픽업에 충분히 적용 가능한 결과이다.

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

## 참고문헌

- [1] Carola Strandman et al., 1995, "Fabrication of 45° mirrors together with well-defined V-grooves using wet anisotropic etching of silicon", J. Microelectro-mechanical Syst., Vol.4, No.4, pp.213-219.
- [2] Kiyoshi Manoh, et.al, 2003, "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.
- [3] Kazuhiko NEMOTO and Kazuo HONDA, 2002, "Integrated Optical Devices for Optical Disk Applications", IEICE Trans. Electron., Vol.E85-C, No.4, pp.1001-1008.
- [4] Takeshi MAEDA, 2003, Motoyasu TERA0 and Takeshi SHIMANO, "A Review of Optical Disk Systems with Blue-Violet Laser Pickups", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.42, pp.1044-1051.
- [5] G. Ensell, 1996, "Alignment of mask patterns to crystal orientation", Sensors and actuators A 53, pp.345-348.
- [6] E.van Veenendaal, K.Sato, M.Shikida and J.van Suchtelen, 2001, "Micromorphology of single crystalline silicon surfaces during anisotropic wet chemical etching in KOH and TMAH", Sensors and Actuators A 93, pp.219-231.
- [7] Kazuo Sato, Mitsuhiro Shikida, Takashi Yamashiro, Masaki Tsunekawa and Shunji Ito, 1999, "Roughening of single-crystal silicon surface etched by KOH water solution", Sensors and Actuators 73, pp.122-130.
- [8] Mitsuhiro Shikida, Takehiro Masuda, Daisuke Uchikawa and Kazuo Sato, 2001, "Surface roughness of single-crystal silicon etched by TMAH solution", Sensors and Actuators A 90, pp.223-231.