

# LIGA 공정을 이용한 삼면반사체 제작

오동영\*, 정동관\*\*, 박노열\*\*, 장석상\*\*\*, 이승섭\*

## Fabrication of A 3-facet Mirror Using the LIGA Process

Dong-young Oh\*, Dong Kwan Jung\*\*, Noh Y. Park\*\*, Suk Sang Chang\*\*\*, and Seung S. Lee\*

### ABSTRACT

In this paper, a technology for the fabrication of the oblique structure using the LIGA process will be presented. The fabricated microstructure is a tetrahedral 3-facet mirror. The mirror has an equilateral triangular base of hundreds  $\mu\text{m}$  length, mirror-like three side-facets inclined to the base at  $45^\circ$ , and knife edges. Two regular triangles of gold absorber in the X-ray mask shade the PMMA from synchrotron radiation of two times inclined at the angles of  $45^\circ$  and  $\tan^{-1}2$ . After development, the shaded part of the PMMA, the tetrahedral mirror remains. The completed mirror shows excellent aspects of mirror-like facets and knife-edges. By controlling the gap between the mask and the substrate, the size of mirror easily can be changed. This mirror would be used as a laser beam splitter for the feedback control of the HDD slider.

**Key Words** : LIGA(Lithographie, Galvanoformung, Abformung), 3-facet mirror(삼면반사체), Tilted X-ray Irradiation(경사 노광), HDD slider(하드 디스크 드라이브 슬라이더)

### 1. 서론

LIGA 공정은 수십  $\mu\text{m}$ 에서 수 cm 두께의 정밀한 미세 구조물을 제작할 수 있는 기술로서 널리 알려져 있다. LIGA 공정은 방사광 가속기의 X-선을 이용한 노광 공정(Deep etch X-ray lithography: DXRL)과 전기도금(Electroplating), 사출성형(Molding)의 일련의 제작 공정을 말하는 것으로, "LIGA"라는 용어도 이들 공정을 의미하는 독일 단어(Lithographie, Galvanoformung, Abformung)의 두문자어이다. LIGA 공정으로 제작된 마이크로 구조물은 수직 벽면을 갖고 있으며 벽면의 거칠기(p-값)는 30-50 nm 정도로 매우 매끈하다<sup>[1,2,3]</sup>.

방사광을 이용한 일반적인 노광 공정은 X-선 마스크와 레지스트를 방사광에 수직으로 위치시키고, X-선 마스크의 흡광체 패턴이 레지스트에 전사되어 수직벽을 가진 두꺼운 레지스트 구조물이 만들어진다. 이러한 단순한 2.5 차원의 레지스트 구조물은 X-선 마스크와 레지스트를 방사광에 비스듬하게 기울여 노광하거나(경사노광) 정렬된 다중 노광을 통하여 다양한 형태로 제작될 수가 있다.

본 논문에서는 경사노광을 이용하여 수백 마이크로 크기의 삼면반사체(3-facet mirror)를 제작하였다. 일정한 간격으로 배치된 두 개의 정삼각형 모양의 흡광체를 가진 X-선 마스크와 레지스

\* 포항공대 기계공학과

\*\* 삼성종합기술원 정밀기계 Lab.

\*\*\* 포항방사광가속기 연구소

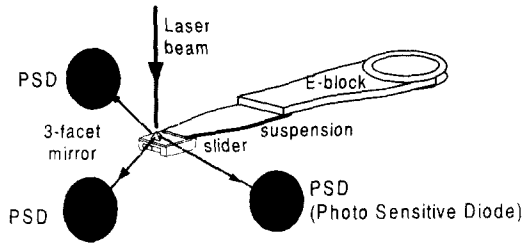


Fig. 1 HDD slider movement detection system

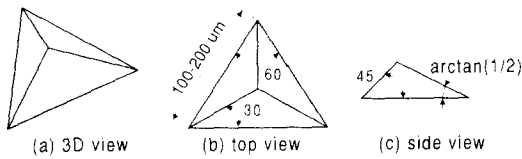


Fig. 2 Features of the 3-facet mirror

Table 1 Specs. of the 3-facet mirror

Angle tolerance	$\pm 0.3^\circ$
Flatness	wavelength/10
Scratch & dig(roughness)	sub 10 $\mu\text{m}$
Edge	knife edge

트를 방사광에 두 번 경사노광 후, 현상을 하면 삼면반사체 모양의 레지스트 구조물이 완성된다. 삼면반사체는 하드 디스크 드라이브(HDD)의 슬라이더의 운동특성을 측정하기 위해서 고안된 것이다<sup>[4]</sup>. Fig. 1에서 보듯이 삼면반사체의 꼭지점에 레이저가 수직으로 입사 되고 세 방향으로 반사된 레이저의 위치를 PSD(photo sensitive diode)로 측정하여 슬라이더의 운동특성을 관찰할 수가 있다. 측정된 슬라이더 끝 단의 6 자유도 운동 특성은 슬라이더와 하드 디스크 간의 간격을 최소화시키거나 정확한 슬라이더 제어연구에 응용되게 되어 차세대 고집적 HDD 개발에 필요한 자료로 사용된다.

정확한 레이저의 반사를 위해서는 삼면반사체의 옆면(반사면)은 경사각이 정확하고 거울면으로 가공되어야 하며, 꼭지점과 모서리는 날카롭게 가공되어야 한다(Fig. 2와 Table 1 참조). 제작된 미세 삼면반사체 모양의 PMMA 레지스트 구조물에 금이나 알루미늄 등의 금속을 수백 Å 증착시켜 레이저가 잘 반사되도록 한다.

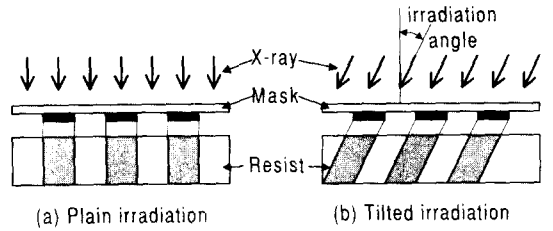


Fig. 3 Tilted irradiation

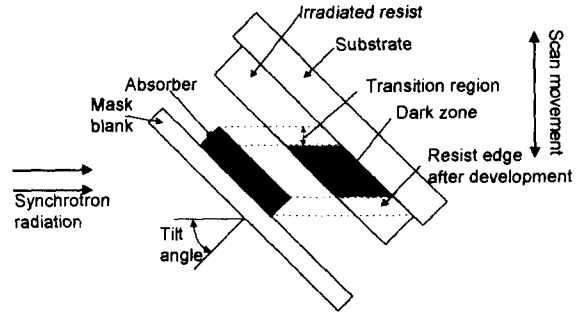


Fig. 4 Dose deposition for tilted irradiation

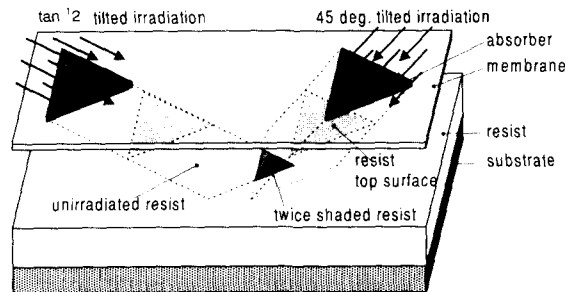


Fig. 5 Fabrication technique of 3-facet mirror by two times tilted irradiation

## 2. 경사 노광

### 2.1 경사 구조물 제작

방사광 노광을 이용하여 옆면이 경사진 구조물을 제작하는 방법에는 경사노광을 이용한 방법과 레지스트의 노광량에 따른 현상속도의 차이를 이용한 방법이 있다. 경사 노광은 단순히 X-선 마스크와 레지스트를 방사광에 비스듬하게 기울이기만 하면 되기 때문에, 공정이 간단하고 정확한 치수와 경사각의 구조물을 만들 수가 있다. 하지

만, 다양한 경사각을 가진 구조물을 만들기 위해서는 여러 번 노광 해야 하는 단점을 갖고 있다. 경사노광을 이용하여 경사면을 제작한 예에는 photonic crystal<sup>13)</sup>, 광섬유 가이드<sup>14)</sup>, 마이크로 밸브<sup>15)</sup> 등이 있다.

레지스트는 방사광 노광량에 따라서 현상속도가 달라지게 된다. 흡광체 두께를 변화시키거나 노광시간을 조절하여 레지스트 노광량을 변화시킬 수가 있으며, 현상 조건을 잘 조절하여 경사 구조물을 제작할 수가 있다. 하지만, 반복성이 떨어지고 치수 정밀도가 좋지 못한 단점이 있다. 움직이는 X-선 마스크를 이용하여 경사진 노즐을 제작하였고<sup>17)</sup>, 흡광체 두께를 얇게 하고 현상 조건을 조절하여 경사면을 제작한<sup>18)</sup> 예 들이 있다.

삼면반사체는 치수의 정밀도와 반사면의 거칠기가 매우 중요하기 때문에 경사 노광을 이용하여 제작하였다.

## 2.2 경사 노광

Feiertag 등은 실험과 시뮬레이션을 통해서 경사노광에서 발생할 수 있는 몇 가지 문제점을 다음과 같이 제시하였다<sup>19)</sup>.

- (1) 마스크의 흡광체의 가장자리(absorber edge) 부분이 방사광에 비스듬하게 위치하게 되므로, 흡광체에 의해서 가려지는 부분과 노광되는 부분의 경계(transition region)가 넓게 분포하게 된다(Fig. 4 참조). 계산과 실험에 의하면 500 $\mu\text{m}$  두께의 PMMA(실험에 사용된 X-선 레지스트)를 45도로 경사노광할 경우, 약 1 $\mu\text{m}$  범위 안에서 경사면이 만들어진다.
- (2) 마스크 흡광체의 표면과 바닥의 거칠기가 레지스트에 전사되어 레지스트의 표면 거칠기에 영향을 준다. 광택제를 이용하여 흡광체를 도금하면 표면의 거칠기를 줄일 수가 있고, 거칠기가 작은 마스크 투과체를 사용하면 바닥의 거칠기를 줄일 수가 있다.
- (3) 다중 경사노광으로 레지스트를 여러 번 방사광에 노광시키면, 노광량의 최대 허용치를 초과하여 레지스트에 손상을 입힐 수가 있다.

(1)의 원인에 의해 발생할 수 있는 경사각의 오차는 500 $\mu\text{m}$  두께의 PMMA 를 45도로 경사노광 하였을 때, 약 0.001도 정도로 삼면반사체의 오차 범위를 충분히 만족한다. (2)의 경우, 광택제를 사용하여 도금을 하면 흡광체에 심한 내부 응력이

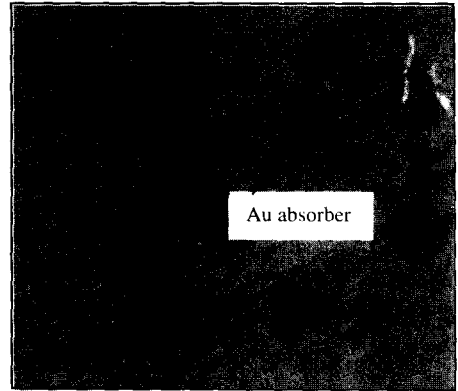


Fig. 6 Fabricated X-ray mask patterns

발생하게 된다. 광택제를 사용하지 않고 도금속도를 느리게 하여 도금을 하여도 충분히 부드러운 표면을 가진 흡광체를 얻을 수가 있다<sup>19)</sup>. 삼면반사체 제작을 위해서는 두 번의 경사노광을 하게 되는데, PMMA 의 바닥과 표면에 입사되는 에너지는 각각 5kJ/cm<sup>3</sup> 와 8kJ/cm<sup>3</sup> 정도로 최대 허용치 (20kJ/cm<sup>3</sup>) 미만이다.

## 3. 삼면반사체 제작

### 3.1 X-선 마스크의 설계 및 제작

#### 3.1.1 삼면반사체의 제작 원리

Fig. 2에서 보이는 것과 같이, 삼면반사체의 밑면은 정삼각형 모양이고, 옆면의 한 모서리와 옆면은 밑면과 각각  $\tan^{-1}(1/2)$ 도와 45도의 각을 이루고 있으며, 밑면 정삼각형을 이등분하는 수직면에 대해서 대칭되는 구조를 갖고 있다. 삼면반사체는 두 개의 정삼각형 모양의 흡광체를 가진 마스크를 이용하여 두 번의 경사노광으로 제작할 수가 있다(Fig. 5 참조). 우선, 옆 모서리의 경사각인  $\tan^{-1}(1/2)$ 의 수직각(90°)에 대한 보각인  $\tan^{-1}2$ 도 만큼 마스크와 흡광체를 방사광에 대해서 기울여 노광하면, 흡광체 삼각형의 한 꼭지점과 옆의 두 변은 각각 반사체의 모서리와 옆의 두 면이 만들어진다. 그리고, 생성된 모서리에 마주하는 옆면의 경사각인 45도의 보각인 45도만큼 기울여 노광을 하면, 흡광체 꼭지점의 대변이 삼면반사체 모서리의 대면을 만들어 주게 된다. 두 번의 노광 과정에서, 두 개의 정삼각형 흡광체에 의해서 방사광에 두 번 모두 공통적으로 가려지는 부분이 삼면반사체가 된다.

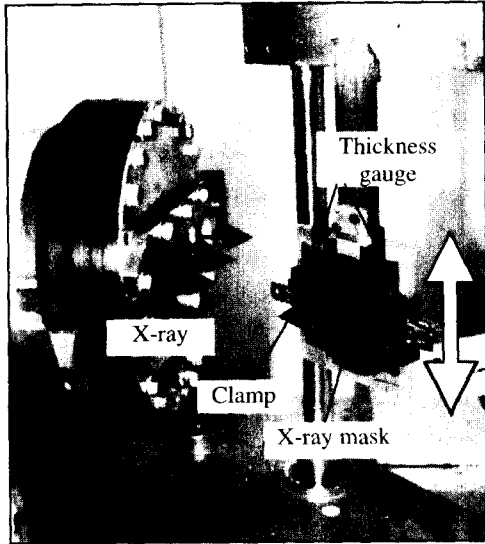


Fig. 7 LIGA beam-line at PLS. The scanner system is tilted by 45 deg. to synchrotron irradiation

### 3.1.2 X-선 마스크의 설계

삼면반사체의 크기는 정삼각형 흡광체의 크기와 두 삼각형 사이의 거리, 그리고 마스크와 레지스트 기판(substrate) 사이의 간격에 의해서 결정된다. 흡광체의 크기는 삼면반사체 밑면의 크기보다 여유 있게 설계하여야 깨끗한 모양을 얻을 수가 있다. 흡광체의 크기와 거리가 일정한 경우, 마스크와 레지스트 기판 사이의 간격을 변화시키면 삼면반사체의 크기를 변화시킬 수 있다.

간격을 좁히면 크기가 줄어들고, 간격을 넓히면 크기가 커진다. 정확한 치수의 삼면반사체를 제작하기 위해서는 마스크와 기판사이의 간격을 정확하게 만드는 것이 중요하다. X-선 마스크 흡광체의 크기와 흡광체 사이의 간격은 삼면반사체의 크기와 마스크와 기판사이의 간격과 경사각의 간단한 기하학 계산에 의해서 구할 수가 있다.

HDD 슬라이더의 운동에 끼치는 영향을 최소화하기 위해서는 삼면반사체의 크기가 작고 가벼워야 하며, 레이저가 입사되어 반사되는 꼭지점 부분의 가공상태가 매우 중요하다. 반면에, 삼면반사체의 크기는 레이저가 입사될 수 있는 100-200 $\mu\text{m}$  정도로 상당한 여유를 가진다. 그러므로, 흡광체의 모서리와 변은 날카롭고 깨끗하게 만들어져야 하고 마스크와 기판 사이의 간격은 10-20 $\mu\text{m}$  정도의 오차를 허용할 수 있다.

### 3.1.3 X-선 마스크의 제작

마스크 흡광체는 한 변의 길이가 300 $\mu\text{m}$  인 정삼각형으로 하였고, 마스크와 기판사이의 간격이 200 $\mu\text{m}$  일 때 변의 길이가 각각 100 $\mu\text{m}$ , 150 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$  인 정삼각형을 밑면으로 갖는 삼면반사체가 만들어지도록 두 정삼각형을 배열하였다.

방사선 노광을 위한 X-선 마스크는 X-선을 잘 투과시키는 물질(원자번호가 작은 물질)을 투과체(mask blank)로 하고, 투과체의 표면에 X-선을 잘 흡수하는 물질(원자번호가 큰 물질)을 흡광체로 하여 제작한다. 본 연구에서는 저압 화학 증기 증착법(Low Pressure Chemical Vapor Deposition; LPCVD)으로 제작된 두께 1.5 $\mu\text{m}$  의 저응력의 실리콘 질화막(SiN)을 투과체로 사용하였으며, 10 $\mu\text{m}$  두께로 전기도금한 금을 흡광체로 사용하였다. 실리콘 질화막의 표면 거칠기는 수 Å 정도로 매우 매끄럽기 때문에 도금된 흡광체의 바닥 또한 매우 매끄럽게 된다.

실리콘 산화막(SiO<sub>2</sub>)이 2000Å 두께로 증착된 4 인치 실리콘웨이퍼(Si wafer)에 LPCVD 로 실리콘 질화막(SiN)을 1.5 $\mu\text{m}$  정도 증착시켰다. 증착된 박막 위에 전기도금을 위한 전도층(seed layer)으로 크롬(Cr)과 금(Au)을 각각 300Å 두께로 증착시킨 후, 자외선(UV) 감광물질(Photo-resist; PR)인 AZ 9262 를 약 16 $\mu\text{m}$  두께로 도포하였다. Cr 마스크를 이용하여 깨끗한 정삼각형 모양을 PR 에 UV 노광하였다.

노광된 정삼각형에 Neutronex 309 전기도금액을 이용하여 2mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도와 0.1 $\mu\text{m}$  /min의 전착률에서 10 $\mu\text{m}$  두께로 금을 도금하였다. 도금에 광택제는 사용하지 않았으며 도금된 흡광체 표면의 거칠기는 약 20nm 정도였다. 도금된 웨이퍼 뒷면의 실리콘 질화막을 이온건식식각(Reactive Ion Etching; RIE)을 이용하여 제거한 후, KOH 용액(33%, 80°C)으로 실리콘을 습식식각(wet etching)하여 박막을 만들었다.

## 3.2 경사 노광을 이용한 삼면반사체의 제작

### 3.2.1 X-선 레지스트와 기판

삼면반사체의 구조물로 사용될 X-선 레지스트는 PMMA(Poly methyl methacrylate; Goodfellow社의 ME303010)를 사용하였다. 티타늄(Ti)이 3000Å 정도 증착된 4 인치 실리콘 웨이퍼에 액상 PMMA (PMMA 950K, OMM社)를 2 $\mu\text{m}$  정도 도포하고

180℃에서 1 시간 동안 열처리한 후, PMMA 판을 MMA 를 이용하여 웨이퍼에 붙이고 100μm 두께로 가공하였다. PMMA 접착에 의한 스트레스에 의해서 실리콘 웨이퍼에 약간의 휨이 발생하는 것을 관찰 할 수가 있었다.

### 3.2.2 경사 노광 및 현상 공정

방사광 노광은 포항방사광가속기(Pohang Light Source; PLS)의 LIGA 빔라인에서 수행하였다. 가속기에서 나오는 방사광은 높이 1cm 정도의 긴 슬릿(slit) 모양이다. 마스크 전체에 골고루 노광하기 위해서는 시편을 반복해서 움직여주는 스캐닝 시스템(scanning system)이 필요하다. Fig. 7은 45도로 경사노광을 하는 모습이다. 마스크와 PMMA 기판 사이에는 200μm 두께의 두께 게이지(thickness gauge)를 끼워서 간격을 유지하고, 클립(clip)으로 고정시켰다. 시편은 상·하 왕복운동을 하는 스캐너(scanner)에 장착하였고, 경사노광을 위해 스캐너를 방사광에 비스듬하게 위치시켰다. 스캐너를 정확한 각도로 위치시킬 수 없기 때문에 삼면반사체의 경사각이 정확하지 못

하다. 정밀한 치수의 삼면반사체의 제작을 위해서는 마스크와 PMMA 기판사이의 간격과 경사각 등을 정확하게 제어할 수 있는 뛰어난 스캐너가 필요하다<sup>11)</sup>.

45도와 tan<sup>-1</sup>2도의 각도로 두 번 경사노광한 후, PMMA 를 현상액(developer)으로 상온에서 500rpm으로 교반을 하면서 2시간 동안 현상을 하였다. 현상액은 GG developer( 60 vol% Di (ethyleneGlycol) butyl ether, 20 vol% Morpholine, 5 vol% Ethanolamine, 15% DI water)<sup>11)</sup>를 사용하였다.

현상이 끝나면 삼면반사체 모양의 PMMA 구조물이 나타난다. PMMA 는 빛을 아주 잘 투과시키는 특성을 갖고 있는데, 레이저가 잘 반사되도록 하기 위해서 금을 약 500Å 두께로 증착시켰다. 증착된 금은 전자현미경(SEM) 사진 촬영을 위해서도 필요하다.

### 4. 제작 결과

Fig. 8은 제작된 삼면반사체의 SEM 사진이다. 반사면이 매끄럽고 모서리가 날카롭게 가공된 것

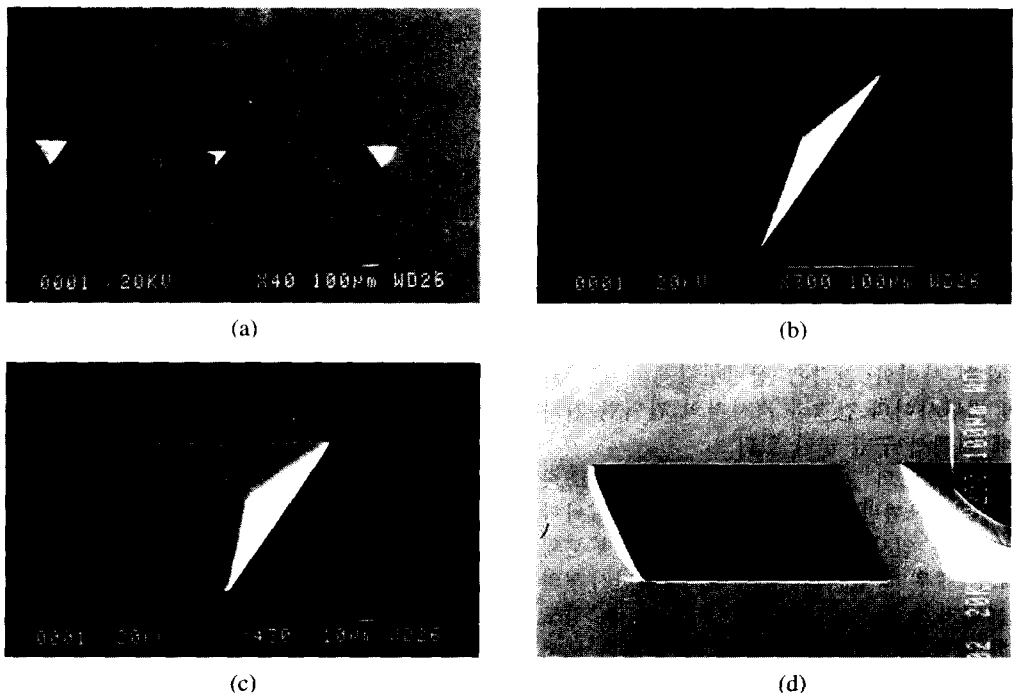


Fig. 8 SEM photos of the fabricated 3-facet mirrors. (a) 3-facet mirrors; top view. (b) 30deg tilted view. (c) 20deg tilted view. (d) Test structure for the flatness and roughness.

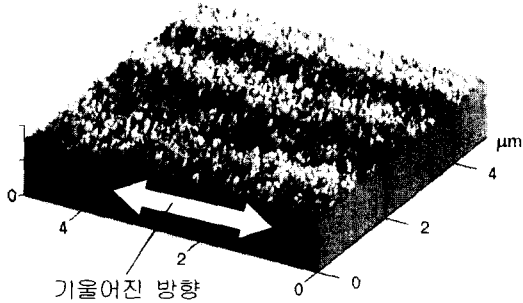


Fig. 9 Surface roughness of the side wall measured by AFM.

Table 2 Flatness and roughness of the inclined wall

	Rms (nm)	Average (nm)	Peak value(nm)	Scan range( $\mu\text{m}$ )
Flatness	5	10	45	125
Roughness	9.31	30.2	68.7	5× 5

을 볼 수 있다. 하지만, (c)의 시편의 반사면에 간선이 보이는 데, 이 선은 PMMA 을 붙이고 가압하는 과정에서 발생한 크랙이라고 생각된다. 그 외에 (b), (c)의 사진에서 반사면에 작은 크랙같은 것들이 관찰되는데 이들 크랙의 정확한 원인은 알 수가 없으며, Au 를 증착하는 과정에서 발생한 열이나 SEM 의 전자빔에 의한 PMMA 의 화학반응에 의한 것일 수도 있다. 이들 크랙은 크기가 작고 반사면에 국소적으로 분포하기 때문에 레이저의 반사에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

#### 4.1 치수 정밀도

같은 X-선 마스크를 이용하여 여러 개의 시편을 제작하였는데, 시편에 따라서 삼면반사체의 크기가 다르게 나타났다. 삼면반사체의 밑면의 길이가 흡광체 길이인 300 $\mu\text{m}$  보다 큰 경우도 있었으며, 삼면반사체가 아예 나타나지 않은 경우도 있었다. 이러한 현상은 X-선 마스크와 기판사이의 간격이 일정하지 않아서 나타나는 현상으로 간격이 좁아지면 삼면반사체의 크기가 작아지고, 간격이 넓어지면 크기가 커지게 된다. 간격이 일

정하지 않은 것은 클립 고정에 의한 X-선 마스크의 휨이나 PMMA 판의 접합에 의한 실리콘웨이퍼의 휨에 의한 것으로, 정확한 크기의 삼면반사체 제작을 위해서는 휘어짐을 최소화하고 간격을 정밀하게 조절할 필요가 있다. Fig. 8 은 설계된 수치에 가장 가까운 시편의 SEM 사진이다.

광학식 치수 측정기(ACCURA 1500F, 인텍 엔지니어링社)를 사용하여 삼면반사체의 크기를 측정해보았다. 꼭지점이 날카로워서 삼면반사체의 높이는 측정할 수가 없었고, 밑면의 길이와 각도만 측정이 가능하였다. 마스크와 기판사이의 거리가 정확하지 않아서 밑면의 길이는 시편마다 다소 큰 차이를 보였지만, 각의 크기는 0.1도 이하의 오차만 나타내었다.

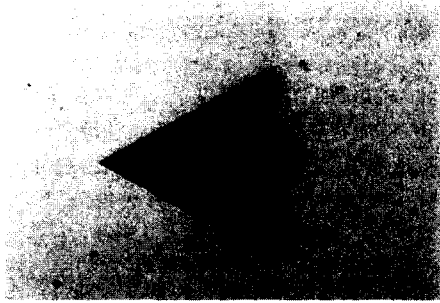
반사면과 밑면이 이루는 경사각의 정밀도는 스캐닝 시스템에 의해서 결정된다. 하지만, 실험에 사용된 스캐너는 경사각을 정확하게 조절할 수가 없기 때문에 정밀도를 확신할 수가 없다.

#### 4.2 반사면의 특성

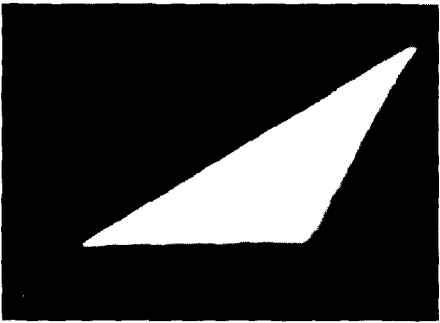
##### 4.2.1 표면 거칠기와 평면도

삼면반사체의 반사면인 옆면의 평면도와 표면 거칠기를 측정해보았다. 평면도는 알파-스텝( $\alpha$ -step 200, Tencor Instrument)을 사용하여 측정하였고, 표면 거칠기는 Atomic Force Microscopy (AFM) (AutoProbe M5, PSI社)를 사용하여 측정하였다. 45도나 기울어진 반사면에 직접 탐침을 접촉시켜 측정하는 것은 어렵기 때문에,  $\tan^{-1}(1/2)$ 도만큼 기울어진 측정면(Fig. 8(d) 참조)을 제작하였다. 측정면은 삼면반사체와 함께 경사노광에 의해서 제작되었다. 평면도는 경사면에서 125 $\mu\text{m}$  떨어진 두 점을 잇는 직선 위의 점들의 높이차를 이용하여 측정하였고, 표면 거칠기는 경사면 위의 5×5 $\mu\text{m}^2$  넓이의 사각형의 거칠기를 측정하였다.

측정된 평면도와 표면 거칠기는 Fig. 9 와 Table 2 에 나타나 있는데, Table 1 의 요구사항을 충분히 만족시키고 있다. 거칠기가 평면도 보다 더 큰 값을 나타내는 이유는, AFM 의 탐침이  $\alpha$ -step 의 탐침에 비해서 날카롭기 때문이다. Fig. 9 의 거칠기 그래프를 보면, 경사면의 표면에 방사광의 진행방향과 평행한 방향으로 수십 nm 의 낮은 골이 형성된 것을 볼 수 있는데, 이러한 골들은 경사노광에 의해서 absorber 표면 거칠기(20nm)가 전사되어 나타난 것이다.



(a)



(b)

Fig. 10 Illumination of the 3-facet mirror. (a) Top illumination. (b) Side illumination

#### 4.2.2 빛의 반사

삼면반사체에서 빛이 반사되는 것을 확인하기 위해서 광학현미경의 광원의 위치를 변화시켜 관찰해 보았다. Fig. 10(a)는 수직으로 빛을 입사한 일반적인 현미경 사진이고, Fig. 10(b)는 광원을 기판에 평행하고 삼면반사체의 한 면을 향해서 빛을 입사한 사진이다. 수직으로 입사된 빛은 반사체의 옆면에 반사되어 수평방향으로 진행하기 때문에 삼면반사체의 모습이 검게 보인다. 반면에 수평방향으로 입사된 빛은 옆면에서 수직으로 반사되어 현미경 대물렌즈로 들어오기 때문에 삼면반사체의 한 옆면이 밝게 빛나고 있다.

#### 5. 결론

방사광을 이용한 경사노광으로 삼면반사체를 제작하였다. 삼면반사체의 모서리와 꼭지점은 날카롭고, 반사면의 평면도와 거칠기는 수십 nm 정도로 매우 뛰어나다. 하지만, 경사각과 크기 등의 치수

정밀도는 좋지 못하다. 보다 정밀한 삼면반사체의 제작을 위해서는 경사노광에서 발생할 수 있는 치수 오차를 실험과 시뮬레이션을 통해서 정확히 알아내고 개선하여야 하며, X-선 마스크와 기판 사이의 간격과 경사각을 정밀하게 제어할 수 있는 스캐닝 시스템이 제작되어야 한다.

삼면반사체를 HDD 슬라이더 운동 측정 시스템에 장착하여 실험해 보지는 못하였다. 다만, 광학현미경을 이용한 조명실험에서 뛰어난 반사 성능을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (1999-2-304-008-4) 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. W. Ehrfeld, D. Munchmeyer, "Three-dimensional microfabrication using synchrotron radiation," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 303, pp. 523-531, 1991.
2. A. Rogner, J. Eichert, D. Munchmeyer, R-P Peters and J. Mohr, "The LIGA technique - What are the new opportunities?," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 2, pp. 133-140, 1992.
3. W. Ehrfeld and Andreas Schmidt, "Recent developments in deep x-ray lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 16, No. 6, pp. 3526-3534, 1998.
4. W. S. Park, H. S. Cho, Y. K. Byun, N. Y. Park, and D. K. Jung, "Measurement of 3-D position and orientation of rigid bodies using a 3-facet mirror", *Proceedings of SPIE*, Vol. 3835, pp. 2-13, 1999.
5. H. Lehr and W. Ehrfeld, "Advanced microstructures products by synchrotron radiation lithography," *Journal de Physique*, vol. 4, pp.C9-229-236, 1994.
6. Timothy W. Tsuei, "Design and fabrication of a LIGA-fabricated microvalve for drug delivery applications," *ASME MEMS'98*, pp. 469-473, 1998.
7. Osamu Tabata, Kouichi Terasoma, Norihiro Agawa and Kouji Yamamoto, "Moving mask LIGA (M2LIGA) process for control of side wall inclination," *IEEE MEMS '99*, pp. 252-256, 1999.
8. Z Liu, F Bouamrane, M Roulliy, R K Kupka, A

Labeque and S Megtert, "Resist dissolution rate and inclined-wall structures in deep x-ray lithography," J. Micromech. Microeng., Vol. 8, pp. 293-300, 1998.

9. G. Feiertag, W. Ehrfeld, H. Lehr, M. Schmidt, "Sloped irradiation techniques in deep x-ray lithography for 3-D shaping of microstructures," Proceedings of SPIE, Vol. 3048, pp. 136-145, 1997.