

## 기판의 표면에너지가 반사경의 산란에 미치는 영향

이범식<sup>†</sup> · 유연석

청주대학교 레이저 광정보공학과  
Ⓣ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36

이재철 · 허덕재

고등기술연구원 포토닉스센터  
Ⓣ 449-863 경기도 용인시 처인구 백암면 고안리 633-2

조현주

대덕대학 총포광학과  
Ⓣ 305-715 대전광역시 유성구 장동 48

(2007년 10월 12일 받음, 2007년 11월 14일 수정본 받음)

ZERODUR와 용융 석영으로 저산란 반사경을 제작하고 산란 특성을 연구하였다. Bowl feed 법을 이용하여 초연마면인 표면거칠기 0.326 Å 인 용융 석영 기판과 표면거칠기 0.292 Å 의 ZERODUR 기판을 얻었다. 이온빔 스퍼터링 방법으로 초연마된 기판 위에 SiO<sub>2</sub>와 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 교번으로 22층을 증착하여 다층박막 고반사 거울을 얻었다. 용융 석영 반사경과 ZERODUR 반사경의 산란이 각각 4.6 ppm과 30.9 ppm으로 측정되었으며, 이로부터 산란이 매우 작은 경우 기판의 표면거칠기가 산란을 결정하는 주요 파라미터가 아니라는 것을 알았다. 나아가 반사경의 표면거칠기를 AFM으로 측정된 결과, ZERODUR 반사경이 용융 석영 반사경 보다 박막의 표면거칠기가 2.3배 더 높게 측정 되었다. 이 결과는 기판-박막 경계면에서 박막 형성 초기에 기판의 화학조성 또는 결정방향과 증착 물질의 상호관계로 인하여 박막 형성 초기에 표면거칠기가 급격히 나빠져서 발생하는 것으로 유추되었다. SEO 300A으로 접촉각 측정을 하여 Giriflaco-Good-Fowkees-Young 방법으로 표면에너지를 계산하였다. 표면거칠기 0.46 Å 을 갖는 용융 석영 기판이 표면 거칠기 0.31 Å 을 갖는 ZERODUR 기판보다 접촉각이 더 작고 표면에너지는 크게 나타났다. 이러한 차이가 기판 종류에 따라 박막형성 초기에 표면거칠기를 다르게 하는 한 요인으로 판단되며, 기판의 표면에너지가 높을수록 미려한 박막표면을 얻는 것으로 확인되었다. ZERODUR의 표면에너지 차이를 설명하기 위해 XPS 분석으로 용융 석영은 Si, O로 구성되었고 ZERODUR는 Si, O, Al, Na 그리고 F로 구성되었다는 것을 알 수 있었다.

주제어 : Bowl feed polishing, Ion beam sputtering, Surface roughness, Total integrated scattering, Surface energy

### I 서 론

최근 20여 년 동안 기판 가공기술과 박막 제작기술이 급속히 발전함에 따라 손실이 매우 작은 고반사율 거울의 제작이 가능해졌고 저산란 고반사 거울의 응용범위가 중력과 측정장치, 링 레이저 자이로스코프(ring laser gyroscope, RLG), 광자 감쇠 분광기 등으로 넓어졌다. 특히 RLG에서 반사경은 필수 부품이다. RLG 내부에서 레이저 광선의 반사가 일어날 때 반사경 표면으로부터 빛의 산란 역시 부분적으로 발생하게 된다. 반사경의 산란으로 발생하는 후방 산란된 빛과 다른 방향으로 회전하는 빛이 동조되어 공진주파수의 차이가 나지 않아 주파수 잠김(frequency lock-in) 이라는 RLG의 기능을 제한시키는 요인을 유발시킨다.<sup>[1,2]</sup> 이러한 제한적 요소는 몸체진동 장치를 적용하여 개선할 수도 있으나 근본적인 개선방안은 되지 못하며, 결국 반사경의 산란성능을 향상시킴으로써 감지능력을 향상시킬 수 있다. 이에 따라 광학면의

거칠기 등의 표면 정보를 측정하는 기술과 반사경의 손실, 흡수, 투과, 산란 특성을 측정하는 기술도 함께 개발되어 왔다. 광학면의 미세표면에 대한 3차원 영상을 측정하는 방법에는 기계식 Stylus, SEM(scanning electron microscope), AFM (atomic force microscope), 광학적 간섭계 등이 있다. 그 중 미세표면에 대한 3차원 영상을 비접촉 방법으로 구하고자 할 경우에는 광학적 형상 측정방법이 간단하고 유용한 기술로 사용된다.<sup>[3]</sup>

광학박막에 입사하는 빛의 투과율, 반사율, 흡수율, 산란율을 각각 T, R, A, S 라 하면, 에너지보존 법칙으로부터

$$T + R + A + S = 1 \tag{1}$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 투과와 흡수는 다층박막의 구조 및 증착물질의 소멸계수와 밀접한 관계가 있고, 산란은 반사경의 표면거칠기와 물질 내부구조와 연관되어 있으며 흡수와 더불어 빛의 손실을 초래하는 요소로 작용한다. 산란은 굴절률이 다른 경계면에서 발생하는 표면 산란과 박막 내부에서 발생하는 체적 산란으로 구성되며, 박막의 증착 방법,

<sup>†</sup> E-mail: pumpsix@naver.com

증착 물질의 종류, 진공도, 내부 결함, 기관의 표면거칠기 등 박막을 제작하는 과정에서 발생한다. 박막의 산란을 계산하는 이론은 박막에서 산란되는 빛의 양을 산란 방향에 관계없이 모두 고려하는 스칼라 산란 이론과 입사한 빛에 의하여 산란되는 빛의 방향을 고려한 벡터 산란 이론이 있다.<sup>[4,5]</sup> 광학면의 표면거칠기와 산란의 관계는

$$TIS = \left( \frac{4\pi\delta_s \cos\theta_i}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

로 주어지고<sup>[6]</sup> 여기서  $\delta_s$ 는 측정면의 rms 표면거칠기 값이며  $\theta_i$ 는 광학 면에 입사하는 광원의 입사각이고  $\lambda$ 는 산란 측정에서 사용하는 파장이다. 이처럼 RLG는 박막 증착기술과 초연마(super-polishing)라는 표면거칠기를 낮추는 초정밀가공 및 이를 측정하는 기술의 현저한 발전으로 미소회전각 감지 성능을 향상시켰다.<sup>[7-9]</sup>

RLG의 몸체는 온도에 따른 광 경로 변화로부터 발생하는 환산계수를 안정적으로 유지하고 긴 작동시간을 보장하기 위하여 열팽창계수가 작고 헬륨 침투성(permeation)이 낮은 ZERODUR를 사용한다. ZERODUR는 독일 SCHOTT사에서 공급하는 유리 세라믹의 제품명으로 열팽창계수가 매우 작은 물질이라는 의미를 갖고 있으며, 석영 유리에 비하여 1/10 이하의 열팽창계수를 갖는 물질이다. RLG용 반사경 기관으로는 작은 산란으로 인하여 RLG의 미소회전각 감지 능력을 향상시키는 용융 석영(fused silica)을 사용하고 있다. 그러나 용융 석영은 ZERODUR와 비교해서 열팽창계수가 10 배 이상 크고 헬륨에 대한 침수성이 높아 RLG용 반사경을 제작하기 위한 기관으로는 최적이지 않다. 또한 용융 석영을 기관으로 사용하는 경우 RLG 운용 시에 불특정한 충격, 온도변화 등으로 반사경과 몸체의 광 접촉(optical contact) 부위에서 레이저의 이득매질인 He-Ne 가스의 미세 누설이 발생하여 RLG 수명에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제점을 인식하고 학문적인 차원과 국내 기술력 확보를 위해서도 ZERODUR를 사용한 저산란 반사경 개발이 필요한 실정이다. 본 연구는 ZERODUR를 사용한 저손실 반사경을 개발하기 위한 일환으로 ZERODUR의 표면거칠기를 최대한 낮추기 위한 연마 공정을 개발하였다. 이를 바탕으로 초연마된 용융 석영 기관과 ZERODUR 기관을 함께 챔버에 장착하여 이온빔 스퍼터링(Ion Beam Sputtering, IBS) 방법으로 반사경을 제작하고 산란을 측정 후 이들 사이의 차이점에 대하여 분석하였다.

## II. Sample 제작 및 측정

### 1. Bowl feed 연마법의 초연마 가공

선진국을 중심으로 표면거칠기를 낮추는 초연마 정밀가공법이 연구되어 여러 방식이 등장하고 최근 들어 급속도로 진보하고 있다. 초연마 기관을 제작하는 방법은 Fresh feed 연마

법, Bowl feed 연마법과 Float 연마법 등이 있으며, ZERODUR를 이용한 초연마 기관 제작은 Bowl feed 연마법으로 연마를 수행하였다. Bowl Feed 연마법은 연마제인 슬러리(slurry)를 담은 특수한 용기를 연마 장비의 회전축에 부착하여 회전축과 용기를 일체형으로 회전시키면서 연마를 진행한다. 교반기는 용기 내부의 가장자리에 장착되었으며, 회전하는 용기에 대해 정지상태의 장애물을 형성함으로써 슬러리의 침전을 강제적으로 억제하여 용기안의 슬러리 농도를 균일하게 유지시키는 역할을 한다. 초연마 시점에서 교반기를 제거하면 용기에 담겨져 있는 슬러리의 연마제가 초연마 중에 입자크기가 큰 것부터 순차적으로 용기 바닥에 침전되어 아주 미세한 부유물만이 남아 슬러리 아래 잠긴 기관을 초연마하는 방법이다.

기관 연마의 첫 단계로 패드 연마법으로 물과 연마제를 섞은 슬러리를 연마반에 펌핑 모터를 이용하여 연속적으로 첨가하면서 기관 표면을 연마하였다. 기관의 평탄도를  $\lambda/8$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ) 이하로 개선시켜 패드 연마공정을 완료한 후 0.5 Å 이하의 표면거칠기를 얻었다. 다음단계로 Bowl feed 연마법으로 초정밀 연마를 수행하였으며, 여기에는 연마제( $\text{CeO}_2$ ) 농도 0.5 wt.%의 슬러리를 사용하였다. 용기 안에서 슬러리의 수위는 연마반이 충분히 슬러리에 잠길 수 있도록 하였다. 슬러리는 연마반과 함께 회전되면서 연마반과 기관의 표면 사이에 연마제를 투입시킨다. 용기와 연마반의 회전속도는 40 rpm이었다. 교반기를 장착한 상태에서 기관의 초연마 공정이 약 20분간 수행되었으며 교반기를 제거하고 약 10분 후에 기관의 연마를 완료하였다. 실질적인 초연마 공정은 교반기를 제거하는 시점부터 시작된다. 뒷면 산란효과를 없애기 위해서 기관의 뒷면도 역시 동일한 방법으로 초연마를 수행하였다. 표면거칠기를 낮추기 위한 변수로는 슬러리 입자

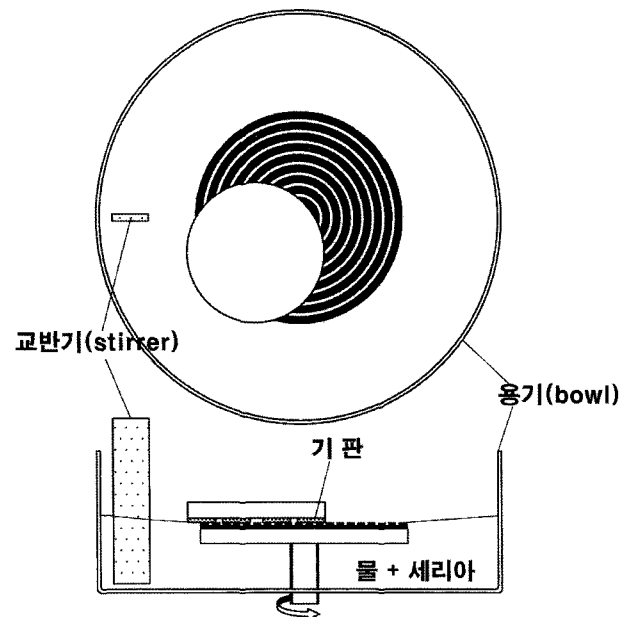


그림 1. Bowl Feed 연마법 장비 구성도.

크기, 연마반의 경도, 수소이온농도 조절 등의 조건을 바꾸어 가며 수행하였다. 기판의 표면거칠기 평가에는 위상천이 간섭계(Phase Shift Interferometer, PSI)의 일종인 Zygo사의 Maxim GP 표면 분석기를 사용하였다. 광학 간섭계의 대물렌즈 배율은 10X, CCD 카메라 배열판의 픽셀 크기는 11×11 μm, 측면 분해능은 1.46 μm이고 최소 수직면 분해능은 0.1 Å이다.

그림 2는 피치 연마반의 경도별로 원형고리 형상과 그물눈 형상으로 홈파기(grooving)하여 초연마한 다음 ZERODUR 기판의 표면거칠기를 측정하여 그 그래프이다. 연마반의 경도와 비례하여 표면거칠기가 향상된다는 것을 알 수 있었다. 가장 연질의 특성을 가지는 피치가 Very soft(#55)이고 피치반의 홈파기 방식에 따라 표면거칠기 향상 정도가 달라지는 것을 확인하였다. 동일한 연마반의 경도에서 보면 항상 원형고리 형상으로 홈파기된 연마반으로 연마된 기판의 표면거칠기가 그물눈 형상으로 홈 파기 된 연마반의 경우 보다 크게 나타났다. 이는 원형고리 형상으로 홈파기된 연마반은 초연마가 진행될수록 기판과의 마찰열 영향으로 연마반과 기판의 밀착이 진행되어 결과적으로 슬러리의 흐름을 방해하여 연마 입자가 기판과 연마반 사이에 투입되지 못하고 대부분 윤활제인 물로만 연마가 진행된 것으로 판단된다. 그러나 그물눈 형상으로 홈파기된 연마반은 홈파기가 연마반 외부와 서로 연결된 구조를 가지므로 인하여, 연마가 진행되면서 마찰열이 발생하여도 연마제의 연마기 내부로의 유입이 원활하여 기판과 연마반의 자연스러운 밀착으로 원형고리 형상 보다 향상된 표면거칠기를 얻은 것으로 판단된다.

그림 3은 슬러리내의 연마제 부유 형태에 따라 초연마 후 표면거칠기를 측정하여 그 그래프이다. 연마입자들이 바닥으로 침전되는 특성을 가진 슬러리(float)가 물 사이에 분산되어있는 연마입자를 가진 콜로이드(colloid) 형태의 슬러리 보다 표면 거칠기가 더 우수한 것으로 나타났다. 이는 연마제의 비중에 따라 무거운 입자는 용기 바닥으로 침전하고 물위에 떠있는 아주 미세한 부유물로만 초연마를 행하는 Bowl feed 연마법

의 원리가 잘 적용되었음을 의미한다. Bowl feed 연마법에서 표면거칠기를 현저히 낮추는 입자크기는 제타 포텐셜(zeta potential)에 의해 액체 중에 침전하지 않고 분산되어 콜로이드로 존재하는 입자보다 더 미세한 것으로 판단된다. 한편, 연마제를 넣지 않고 윤활제 하나만으로 초연마를 할 경우 가장 큰 표면거칠기를 나타내었으며 이는 연마제가 기판의 표면거칠기를 낮추는 역할을 하고 있음을 의미한다. 따라서 표면거칠기가 좋은 기판의 연마를 위해서는 반드시 기계적인 연마를 수행할 수 있는 연마제가 필요하며 그 크기는 작을수록 낮은 표면거칠기를 얻는 것으로 판단된다. 1 μm 연마제에 부유된 입자의 크기를 정확히 측정하는 것은 불가능하였으나 이 실험을 바탕으로 1 μm 연마제를 부유시킨 경우 부유되어 실제 초연마를 수행하는 입자의 크기는 0.08 μm 이하일 것으로 판단된다.

그림 4는 수소이온농도에 따라 표면거칠기를 측정하여 그 그래프이다.

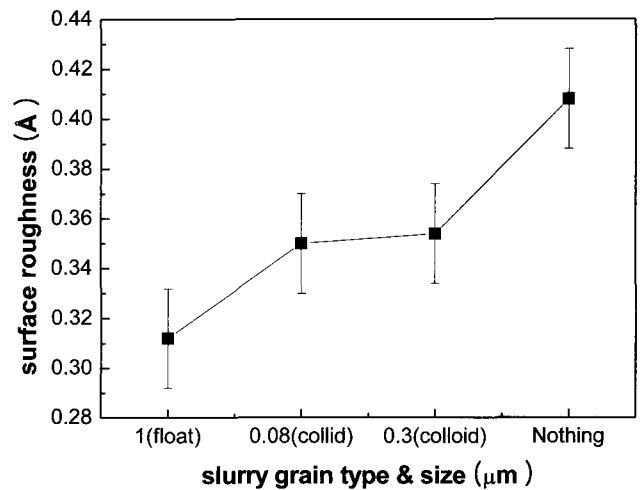


그림 3. 슬러리내 연마입자 유무와 부유형태에 따른 ZERODUR 기판의 표면거칠기 비교.

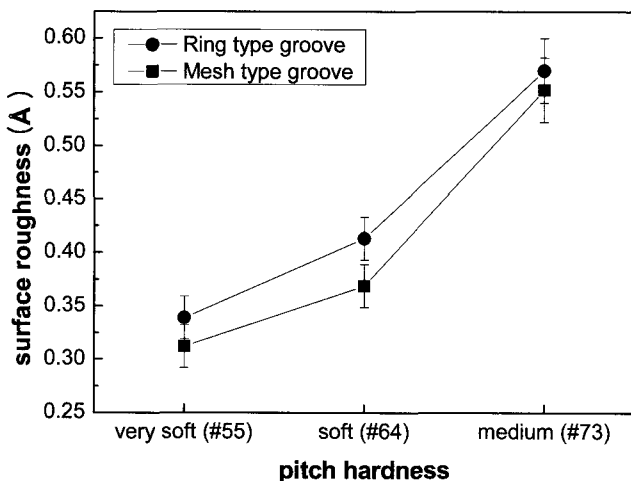


그림 2. 피치 경도의 차이와 연마반 홈파기 형상에 따른 ZERODUR 기판의 표면거칠기 비교.

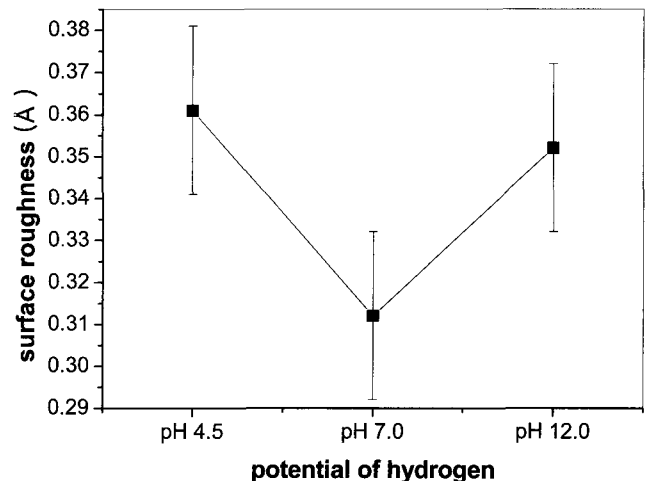


그림 4. 슬러리의 수소이온농도 변화에 따른 ZERODUR 기판의 표면거칠기 비교.

이다. 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)을 첨가하여 수소이온농도를 산성(pH 4.5), 중성(pH 7.0), 알칼리성(pH 12.0)으로 만들어 Bowl feed 연마를 진행하였다. ZERODUR 소재의 수소이온농도는 pH 4.5~pH 5.5 사이에 있어 슬러리를 pH 5.0 정도로 산성화 시켜 초연마를 진행하면 중성 용액으로 초연마된 결과 중에서 최상의 표면거칠기 0.292 Å 보다 향상될 것으로 판단했으나 오히려 더 나쁜 결과를 얻었다. 그리고 알칼리성의 슬러리에서도 중성의 슬러리를 사용한 경우보다 표면거칠기가 거칠게 나타났다. 이는 초연마 가공에서 기판의 수소이온농도와는 무관하게 슬러리의 수소이온농도가 중성이 아닌 경우 기판 표면에 결함을 발생시키는 것으로 판단되며, 따라서 최상의 초연마 면을 얻기 위해서는 중성의 슬러리를 사용하여 기판의 손상을 줄여야 한다.

### 2. 반사경 제작

저손실 반사경을 제작할 때 기판 세척방법에 따라 박막이 빛을 산란시키는 정도는 크게 달라진다. 초연마가 완료된 기판들은 질산암모늄(NH<sub>4</sub>OH)과 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 및 초순수(H<sub>2</sub>O)의 혼합용액을 이용한 1차 세척을 거치고 초순수와 원심력을 이용한 세정기를 사용해 2차 세척을 하였다. 세척된 기판은 오염이 남아 있는지를 세밀히 관찰하였으며 오염이 없는 기판은 챔버 내에 장착하여 바로 진공을 만들었다. 반사경 박막 증착은 IBS 장비를 이용하였으며, 박막의 제작에 사용한 타겟 물질은 지름이 14인치인 원형의 Ta과 SiO<sub>2</sub>를 사용하였다. 박막은 상온에서 성장시켰으며, 고굴절 물질은 스퍼터링 할 때 Ta 타겟에서 물질을 떼어내어 산소분위기 속에서 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 제작하였으며 저굴절 물질은 바로 SiO<sub>2</sub> 표적에 입사시켜 증착하였다. 제작된 반사경은 용융 석영 기판과 ZERODUR 기판 위에 22층으로 구성된다.

$$\text{substrate} | H(LH)^{10} 2L | \text{air}, \quad n_H = 2.05, \quad n_L = 1.47$$

의 구조로 박막을 제작하였으며, 이때 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 박막의 증착율은 0.2 Å/s이고 SiO<sub>2</sub> 박막의 증착율은 0.5 Å/s이었다. 박막 증착은 표 1에 나타난 바와 같이 ZERODUR 기판과 용융 석영 기판 각각 2개씩 총 2회에 걸쳐서 IBS 반사경 제작을 수행하였다.

### 3. 반사경의 산란 측정

반사경의 산란 평가에는 45°로 입사하는 빛에 대한 산란측정이 가능한 산란총량(TIS)법으로 측정 하였다.<sup>[6,10]</sup> 박막의 산란을 측정하기 위한 방법으로 그림 5와 같은 TIS 측정 장비를 구성하여 광원으로는 출력광이 ±5% 이내에서 안정화되고 출력이 1 mW인 He-Ne 레이저(Melles Griot 05 STP 903)를 사용하였다. 이를 단속기(chopper)를 사용하여 진폭 변조한 후 시편 반사경이 부착된 반구형 적분구에 입사시켰다. 광원에서 측정을 위한 반사경까지의 거리는 2 m 정도이고

출력 광원 앞에는 조리개를 놓아 각종 광학계에서 반사된 빛이 광원으로 되돌아오는 것을 방지하였다. 레이저빔은 조리개를 지나 단속기를 통과하면서 주파수 1 kHz로 진폭 변조되어 곡률 반경이 1 m인 반사경을 지나면서 평행광으로 적분반구에 입사한다. 시편에 입사되는 빔의 직경은 대략 0.6 mm이다. 적분반구는 Labsphere사에서 제작했고 크기는 8 인치이며 내벽은 표면 산란율이 632.8 nm에서 97.7%가 되도록 표면처리 되어 있다. 표준 산란기는 Labsphere사의 22.2% (λ = 632.8 nm)를 사용하였다. 적분반구 앞단에 조리개를 놓아 광학계를 거치면서 발생한 불필요한 빔을 제거하였으며, 적분반구는 시편 반사경이 레이저빔에 대해 45°로 빔이 입사되도록 설치하였다.

## III. 분석 및 논의

### 1. 반사경의 산란과 기판의 표면거칠기 분석

그림 6은 초연마면을 갖는 기판의 표면거칠기를 PSI로 측정하고 IBS 박막증착을 수행한 후 각 반사경의 TIS의 산란값을 측정한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 기판의 종류와 관계없이 기판의 표면거칠기가 증가하면 반사경의 산란도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 용융 석영 기판을 사용한 경우 반사경의 산란은 전체 제작된 모든 반사경이 5 ppm 미만인 반면, ZERODUR를 기판으로 사용한 경우 산란은 31~53 ppm으로 용융 석영을 기판으로 사용한 경우에 비하여 7~10배 높게 나타났다. 기판의 표면거칠기가 유사하고 동

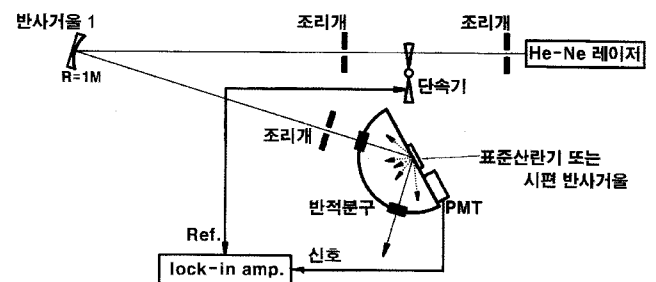


그림 5. TIS 측정 장비 개략도.

표 1. 기판의 표면거칠기와 반사경 투과율, 산란율 측정

기판 No.	기판 Rrms (Å)	IBS	중심파장 (nm)	반사경 45° 투과 (ppm)	반사경 45° 산란(ppm)
#ZD292	0.292	1차	704	234.41	30.93
#ZD303	0.303				35.67
#FS328	0.328				4.19
#FS326	0.326				4.56
#ZD332	0.332	2차	693	244.17	52.86
#ZD329	0.329				51.03
#FS321	0.321				4.15
#FS309	0.309				3.58

일한 세척을 수행하여 같은 챔버에서 동시에 증착된 반사경의 산란이 기판의 종류에 따라 10배 가량의 산란 차이를 발생시킨 것이다. 이는 기판의 종류에 따라 기판-박막 경계면 형성 시에 어떤 차이가 발생함을 의미하며 이를 분석하기 위하여 박막의 내부 구조와 표면상태 그리고 박막과 기판의 결정 상태를 분석하였다.

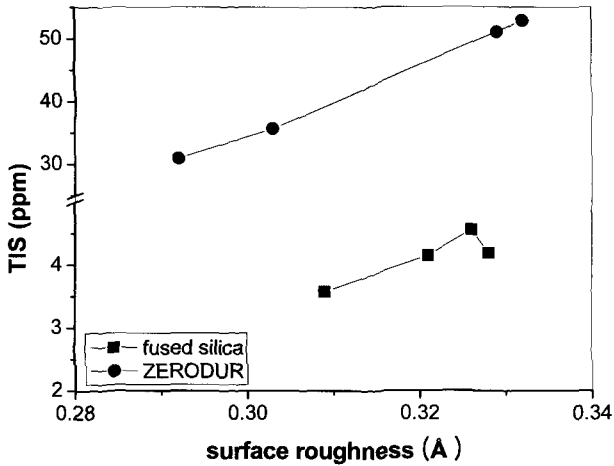


그림 6. 기판의 PSI 표면거칠기와 반사경의 TIS 비교 : ZERODUR 기판을 사용하여 제작된 반사경의 산란이 용융 석영 기판을 사용하여 제작한 반사경에 비하여 산란이 7~10배 크다.

## 2. 박막의 내부구조와 박막표면 분석

기판 및 박막의 결정구조는 X-선 회절기(XRD, XDS 2000)를 이용하여 분석하였다. 입사선으로는 0.154 nm 파장의 Cu-K $\alpha$  선을 사용하였고 5°에서 55°까지 0.02° 간격으로 측정하였다. 용융 석영 기판과 ZERODUR 기판의 XRD 측정 결과를 그림 7의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 용융 석영기판의 경우 실리카 결정만으로 이루어진 반면, ZERODUR 기판은 열팽창계수를 작게 하기 위하여 첨가한 알루미늄 결정과 재료의 광투과 특성을 평탄화하기 위한 나트륨 결정이 실리카 결정과 함께 나타났다. 그림 7의 (c)와 (d)는 각각 용융 석영 기판과 ZERODUR 기판에 22층의 반사경을 증착한 시료에 대한 XRD 측정 그래프이다. 스펙트럼을 증첩한 결과 기판과 반사경의 동일한 위치에 피크가 형성됨을 확인하였으며, 기판의 결정상에 비하여 추가된 결정상이 나타나지 않는 것으로 미루어 IBS 다층 박막은 모두 비정질임을 확인 할 수 있었다. 따라서 그림 6에 보여진 두 기판의 산란 차이는 IBS로 제작된 박막의 결정에 의한 체적산란은 아니며 기판-박막 경계면에서 발생하는 표면산란의 차이로 유추된다.

박막의 표면산란 요인을 확인하기 위해 분해능이 0.5 Å인 원자힘 현미경(AFM, Nanoscope IIIa)으로 2×2  $\mu\text{m}$  주사영역에서 표면 상태를 측정하였다. 1 nm 정도의 매우 작은 형상 차이에 대한 정확한 측정을 위해 태핑모드로 반사경의 표면

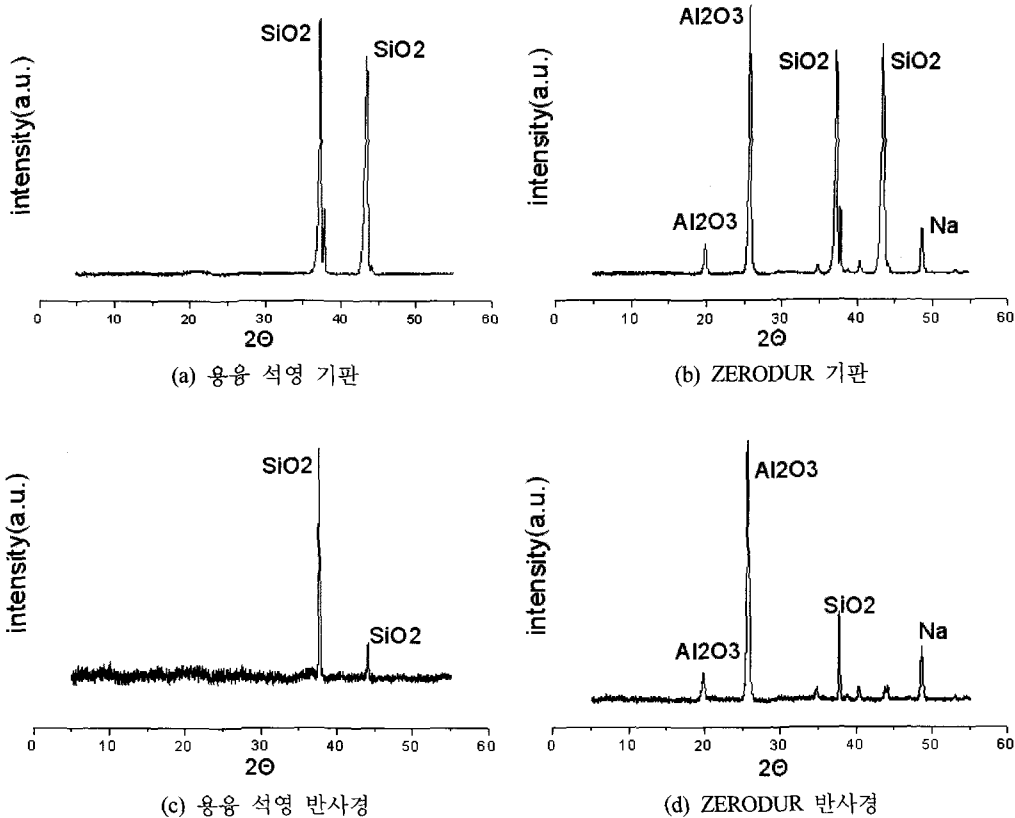
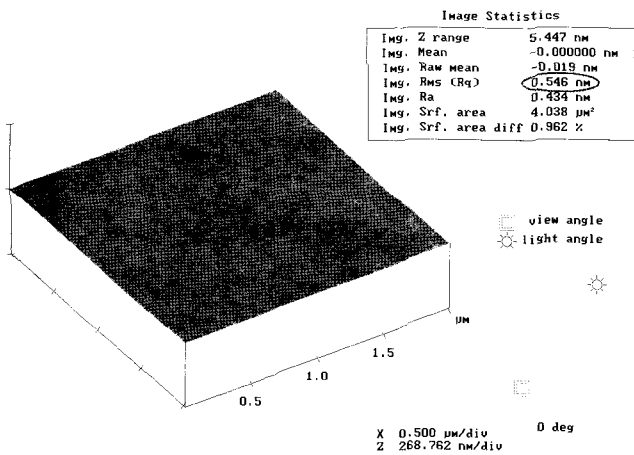


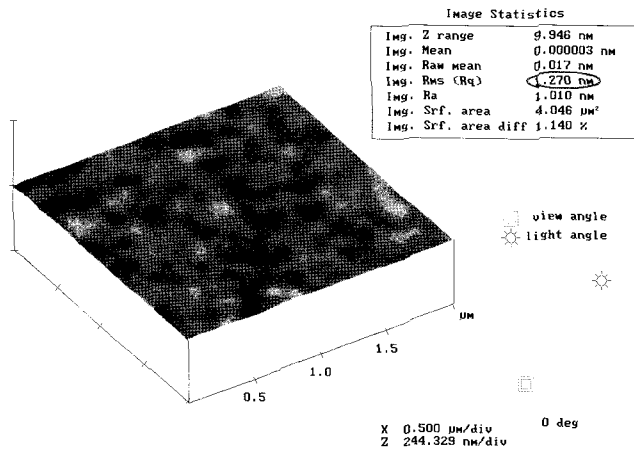
그림 7. XRD 측정결과: 기판과 반사경의 입사각(2 $\theta$ )에 대해 동일위치에서 피크를 보이므로 이온빔 스퍼터링 박막은 비정질이며 따라서 체적 산란을 유발하지 않는 구조이다.

거칠기를 확인하였다. 그림 8의 (a)와 (b)는 각각 AFM으로 용융 석영 기관 및 ZERODUR 기관 위에 증착된 반사경의 표면을 나타낸다. 용융 석영 기관 위에 증착된 반사경의 표면거칠기는 rms 값으로 0.546 nm인 반면, ZERODUR 반사경의 표면거칠기는 1.270 nm로 용융 석영 반사경보다 2.3배 높게 측정이 되었다. 이 표면거칠기 값을 식(2)에 대입하여 박막표면의 거칠기로부터 산란을 계산한 결과 용융 석영 반사경(#FS322)은 5.9 ppm이고 ZERODUR 반사경(#ZD292)는 32 ppm이 된다. 이는 그림 6의 TIS 측정 값 4.6 ppm, 31 ppm과도 유사한 결과를 나타낸다. 따라서 두 기관의 반사경이 나타내는 산란의 차이는 명확하게 반사경 표면의 표면거칠기가 차이나 나서 발생한 결과임을 알 수 있다. 유사한 표면거칠기를 가지는 기관을 사용하여 동일한 세척을 수행하고 같은 챔버에서 동시에 증착한 박막의 표면거칠기가 기관의 종류에 따라 다른 결과를 나타내는 것이다. 따라서 이러한 산란의 원인은 박막의 성장 과정에서는 두 기관에 따라 차이가 발생할 수 없으므로 기관-박막의 경계면에서 박막 형성 초기에 어떤 변화가 발생하고 이 때의 표면거칠기가 반사

경의 표면까지 성장하면서 영향을 주고 있는 것으로 생각된다. 1999년 Dijken 등은 Cu(100) 단결정 기관 위에 몇 개의 분자층 정도의 두께로 얇게 성장시킨 박막이 기관의 대칭성과는 다른 구조로 성장함을 LEED(low energy electron diffraction) 실험을 통하여 관찰하였으며, 이들은 이러한 원인을 증착 원자와 기관 표면원자 사이의 상호작용으로 증착입자의 궤적이 휘어지고 이로 인하여 증착 분포가 변한다는 steering 효과의 모델을 제시하여 설명하였다.<sup>[11]</sup> 이후 이와 관련한 몇몇 보고가 이어졌으며, 2004년 Yu 등은 Cu(100) 기관 위에 Cu를 증착하는 경우와 Ag(100) 기관에 Ag를 증착한 경우 steering 효과가 발생하는 것을 전산모사를 통하여 확인하였다.<sup>[12]</sup> 동일한 결과가 본 실험에서 나오는 것을 확인할 수는 없으나, 이와 유사한 현상이 기관 위에 첫 번째 층인 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 스퍼터링 하는 초기에 발생하여, ZERODUR 기관의 표면거칠기가 급속히 나빠지고 이로 인하여 ZERODUR 기관에 스퍼터링된 반사경의 산란이 용융 석영 기관 위에 제작된 반사경의 산란에 비하여 큰 값을 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 또한 그림 8의 (a)와 (b)를 비교하여 보면 AFM으로 측정된 표면의 형상이 ZERODUR 기관에 증착된 반사경의 경우 표면이 고르지 않고 응집된 모습을 보이며 이는 그림 8(a)의 용융 석영 기관 위에 제작된 반사경과 상이한 모습을 보인다. 그러나 이러한 결과는 보고된 steering 효과를 보이는 경우와 완전히 동일한 조건이 아니므로 앞으로 이론적인 계산 등의 추가 연구를 통하여 확인이 필요하다.



(a) 용융 석영 반사경(#FS326)



(b) ZERODUR 반사경(#ZD292)

그림 8. AFM의 측정결과: ZERODUR의 박막표면에서 언덕이 뚜렷이 보이며 기관-박막 계면이 박막표면에 영향을 준 것으로 판단된다.

### 3. 기관의 원소 조성 및 정량 분석

ZERODUR 기관 표면의 원소 조성을 측정하기 위하여 에너지 분해능 0.5 eV인 X-선 광전자 분광기(XPS, ESCALAB 210)를 사용하여 분석하였다. 이 때 X-선 광원으로 Mg-Kα와 Al-Kα를 함께 사용하였고 그 결과를 그림 9와 표 2에 나타내었다. ZERODUR 기관의 화학적 조성을 분석한 결과 용융 석영과는 다른 원소 조성으로 되어있다는 것을 알 수 있었다. 용융 석영의 경우 순수한 SiO<sub>2</sub>로 이루어진 광학유리로 불순물이 수백 ppm 이하인 고순도의 SiO<sub>2</sub>를 약 2,000°C 이상에서 용융, 용해하여 순도 99.999% 까지 낮춘 광학유리이다. 당연히 불순물이 수십 ppm 이하이므로 거의 SiO<sub>2</sub>로만

표 2. 용융 석영과 ZERODUR 기관 표면의 원소 분석

용융 석영 기관			ZERODUR 기관		
원소	결합 에너지(eV)	원소 농도(%)	원소	결합 에너지(eV)	원소 농도(%)
Si (2p)	102.8	27.5	Al (2p)	73.7	8.4
C (1s)	285	5.3	Si (2p)	101.8	16
O (1s)	531	67	C (1s)	284	7
F (1s)	684	0.2	O (1s)	530.9	62.7
			F (1s)	684	3.5
			Na (1s)	1071	2.4

구성이 되어있다. 한편 ZERODUR 기판을 XPS 분석한 결과 40~50 Å 정도의 표면에서 Si와 O 이외에 Al, Na, F의 불순물이 존재하는 것을 알 수 있었다. 이것은 ZERODUR의 열팽창특성을 결정하는 주요인자로 판단되며, 이러한 원소조성의 차이가 기판-박막 경계면에 표면 형상에 영향을 줄 수도 있을 것으로 사료된다.

4. 표면에너지와 기판 특성 분석

기판의 종류에 따른 표면에너지를 측정하기 위하여 접촉각 시험기 분석을 수행하였다. 본 실험에 쓰인 접촉각시험기(SEO 300A)는 Girifalco-Good-Fowkes-Young 방법을 적용하

여 표면에너지가 72.75 N/m인 증류수를 이용하였으며,<sup>[13]</sup> 분석에 사용된 기판은 표면거칠기를 달리한 3종의 용융 석영과 ZERODUR 기판이다. 각 측정에서 용액은 증류수에 10 μl의 양만큼 떨어뜨려 2초 동안 22°C에 노출 시켰다. 이 때 증류수 방울의 지름이 최대 2 mm 정도를 넘지 않았다. 그림 10에 기판의 종류와 표면거칠기 변화에 따른 접촉각 측정 사진을 나타내었다.

그림 10의 측정으로부터 그림 11과 같은 모델에서 기판 위에 있는 증류수가 이루는 접촉각 θ의 측정이 가능하며, 액체와 기체 사이의 표면에너지 γ<sub>LV</sub>를 알고 있으므로 이를

$$\gamma_{SV} = \frac{\gamma_{LV} (1 + \cos \theta)^2}{4\pi^2} \quad (1)$$

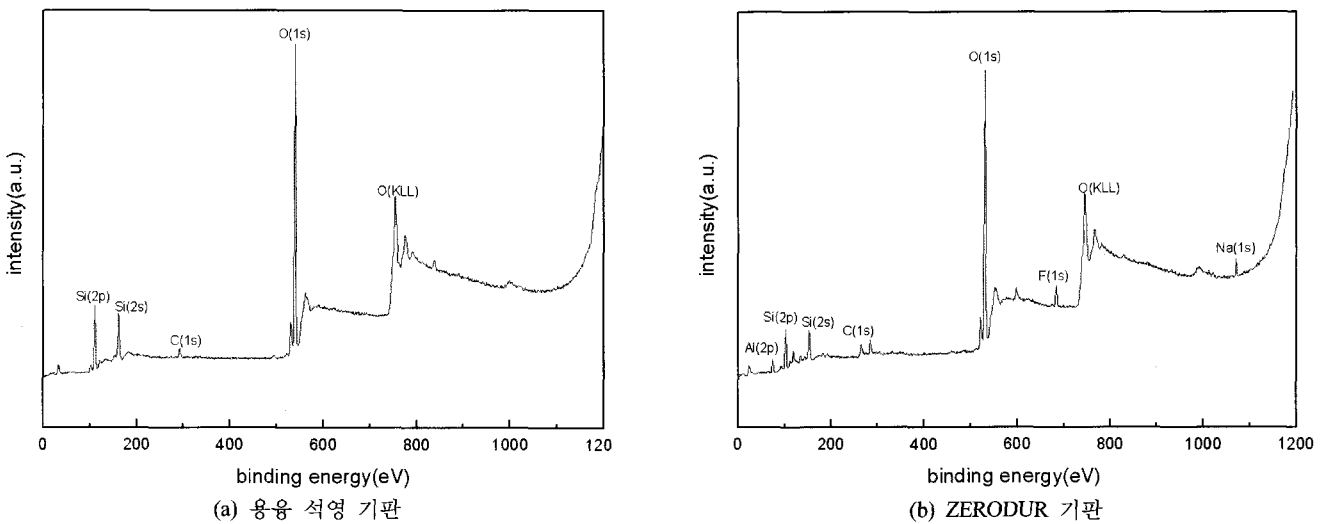


그림 9. 용융 석영과 ZERODUR 기판 표면의 XPS의 결합에너지 스펙트럼 측정.

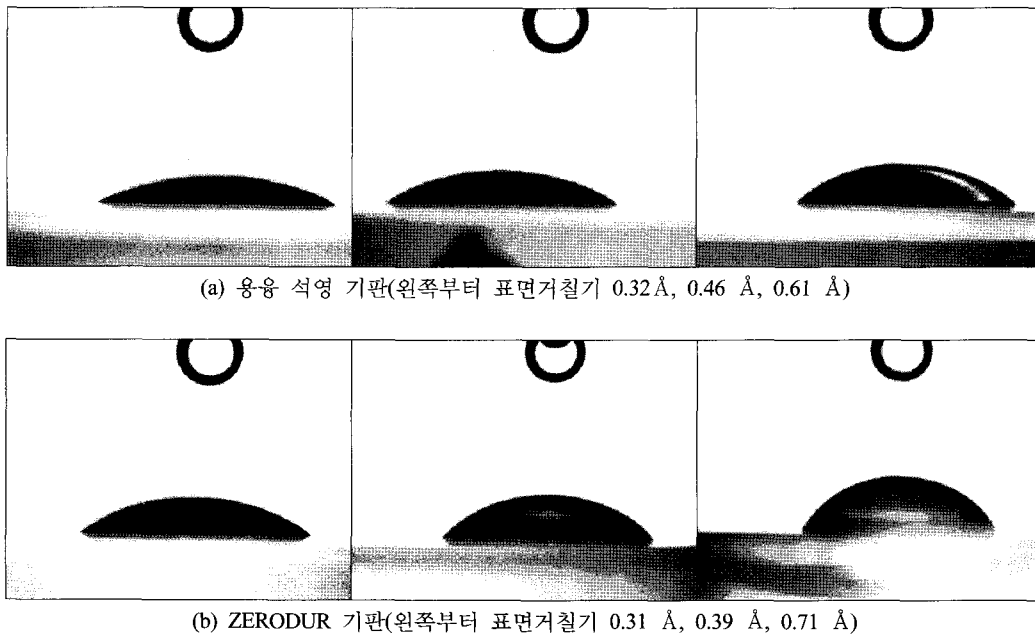


그림 10. 기판 표면거칠기에 따른 접촉각 측정.

표 3. 기판의 표면거칠기에 따른 접촉각과 표면에너지

기판	용융 석영			ZERODUR		
Rms (Å)	0.32	0.46	0.61	0.31	0.39	0.71
접촉각 ( $\theta$ )	28±1	35±1	43±1	38±3	47±3	61±3
표면에너지 (N/m)	6.59	6.16	5.6	6.1	5.45	4.31

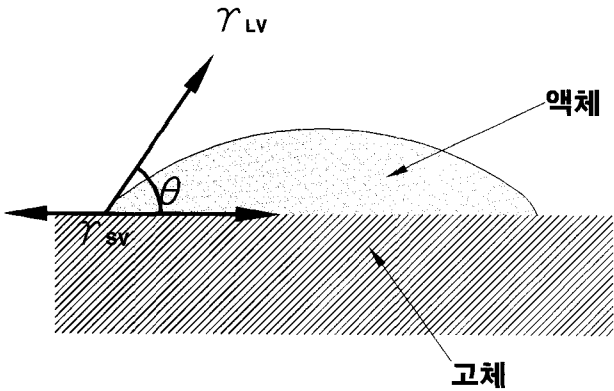


그림 11. 고체표면과 액체방울 고체의 접촉각 측정 개념도.

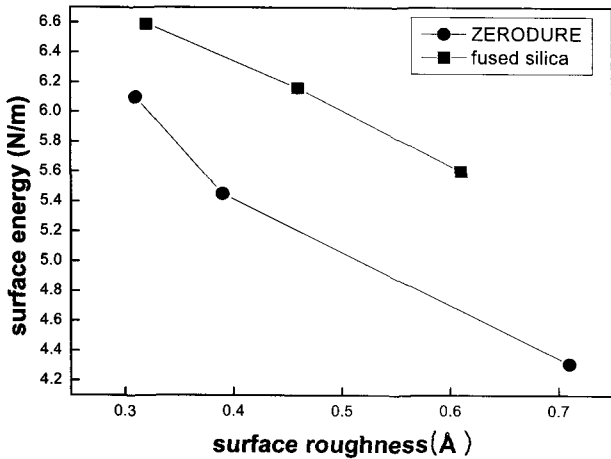


그림 12. ZERODURE와 용융 석영 기판의 표면거칠기와 표면에너지 : ZERODURE는 용융 석영에 비해 낮은 표면에너지를 가졌다는 것을 알 수 있다.

에 대입하면 고체와 기체 사이의 표면에너지  $\gamma_{SV}$ 를 구할 수 있다.<sup>[14]</sup> 그림 12에 PSI로 측정된 기판의 표면거칠기에 따른 접촉각 측정으로부터 계산된 표면에너지를 나타내었다. 모든 접촉각 측정은 3회 반복하여 측정하였으며, 평균값과 편차를 구하였다. 그림 10에 보이듯이 용융 석영 기판에서의 접촉각이 ZERODURE와 비교해서 현저히 낮음을 알 수 있다. 그리고 표면거칠기 0.46 Å을 가진 용융 석영에서의 접촉각이 표면거칠기 0.31 Å의 ZERODURE 기판에서의 접촉각 보다 더 작다. 이는 표면에너지가 클수록 표면거칠기가 작아지며 용융 석영은 ZERODURE에 비해 더 높은 표면에너지를 가졌다는 것을 반영한다. 박막증착에 있어서 표면에너지와 박막 증착과의 상호 관계를 규명하기 위해서는 접촉하는 두 물질의

각각의 표면에너지와 증착 후 형성되는 계면에너지를 알아야 한다. 그러나 계면에너지를 측정하는 것은 용이하지 않으므로 표면에너지를 통해서 계면에서 박막증착의 모델을 유추할 수 있다. XPS 분석을 통해서 얻어진 결과에 의해 순수한 SiO<sub>2</sub>로 이루어진 용융 석영의 큰 표면에너지가 작용하여 박막 물질을 뭉치지 않고 완만하게 만든다는 것을 유추할 수 있다.

#### IV. 결 론

열팽창 계수가 용융 석영에 비하여 10배가량 작은 ZERODURE 기판의 표면거칠기를 낮추기 위해 Bowl feed 연마법을 사용하였으며, 슬러리 입자크기, 연마반의 형태 및 경도, 수소이온농도 조절 등의 조건을 바꾸어 가며 표면거칠기를 최대한 낮추는 작업을 수행 하였다. 콜로이드 형태가 아닌 연마제를 부유시켜 사용한 방법으로 rms 표면거칠기 0.292 Å의 초연마된 ZERODURE 기판을 얻을 수 있었다. ZERODURE 초연마에 있어서 연마제 산도가 미치는 영향은 거의 없이 대부분이 연마제의 입자 크기에 의존함을 알 수 있었으며, 연마제가 없이는 초연마면을 얻을 수 없었다. 따라서 ZERODURE 초연마를 위해서는 중성의 연마액에 0.08 μm 이하의 입자를 부유시켜 연마하며, 이 때 연마반은 연마제가 원활하게 기판과 연마반 사이에 공급되도록 그물형태로 제작하는 것이 좋을 수 있었다.

박막의 빈 공간이 없고 조밀도가 우수한 IBS 방법으로 용융 석영과 비슷한 표면거칠기를 갖는 ZERODURE 기판에 고반사 박막을 제작하여 박막이 ZERODURE 반사경의 산란에 미치는 영향을 알아보았다. 측정된 산란값은 유사한 표면거칠기를 갖는 기판에서 ZERODURE 기판의 산란이 용융 석영 기판의 산란보다 7~10배 크게 나타났으며, 이는 기판 위에 박막이 형성되는 초기에 기판-박막의 경계면에서 발생하는 steering 효과와 유사한 현상이 발생하면서 기판-박막의 경계면의 표면거칠기가 거칠어져서 발생하는 것으로 판단되었으나, 확인을 위한 이론적 전산모사 등의 추가 연구가 필요하다. AFM 측정을 통하여 반사경 표면거칠기가 기판의 종류에 따라 2.3배 차이가 남을 확인하였으며, 표면에너지 측정을 통하여 기판의 종류에 따른 기판 및 표면의 조건이 상이함을 확인하였다. 따라서 기판의 종류에 따른 산란의 차이는 기판의 화학적인 조성뿐만 아니라 결정 구조 및 표면에너지의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] N. F. Aronowitz, "Fundamentals of the Ring Laser Gyro," *Optical Gyros and their Applications* (RTO AGARDograph 339, 1999) chap. 3.
- [2] N. F. Aronowitz, "The Laser Gyro," in *Laser Application: Vol. 1* (Academic press, 1971), pp. 133-200.
- [3] M. Davidsion, K. Kaufman. I. Mazar, and F. Cohen, "An



- Application of Interference Microscopy to Integrated Circuit Inspection and Metrology," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* vol. 775, 1987.
- [4] C. Amra, C. Grezes-Besset, and L. Bruel, "Comparison of surface and bulk scattering in optical multilayers," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 5492-5503, 1993.
- [5] A. Duparre and S. Kassam, "Relation between light scattering and the microstructure of optical thin films," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 5475-5480, 1993.
- [6] J. C. Stover, *Optical scattering: Measurement and Analysis*, (SPIE, optical Engineering Press, Washington, 1995), chapter 4.
- [7] Kenneth D Skeldon, James Mackintosh, Marc von Gradowski, Sophie Thieux, and Richard Lee, "Qualification of supermirrors for ring-laser-gyros based on surface roughness and scatter measurements," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 3, pp. 183-187, 2001.
- [8] Johannes van Wingerden, Has Jan Frankena, and Bertram A. van der Zwan, "Production and measurement of super-polished surfaces," *Opt. Eng.*, vol. 31, pp. 1086-1092, 1992.
- [9] 조민식, 심규민, 권용률, 정태호, 오문수, 이수상, 조현주, 손승현, 문건, 이재철. "저산란 반사경을 이용한 링레이저 자이로의 주파수 잠김 개선," *한국광학회지* 제 13권, pp. 336-339, 2002.
- [10] Hyun-Ju Cho, Myung-Jin Shin, and Jae-Cheul Lee "Effects of substrate and deposition method onto the mirror scattering," *Appl. Opt.*, vol. 45, pp. 1440-1446, 2006.
- [11] S. V. Dijken, L. C. Jorritsma, and B. Poelsema, "Steering-Enhanced Roughening during Metal Deposition at Grazing Incidence," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, pp. 4038-4041, 1999.
- [12] J. Yu, J. G. Amar, and A. Bogicevic, "Fitst-principles calculations of steering forces in epitaxial growth," *Phys. Rev. B*, vol. 69, pp. 113406, 2004.
- [13] F. M. Fowkes, "Attractive Forces at Interfaces," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 56, pp. 40-52, 1964.
- [14] R. E. Johnson, R. H. Dettre, *Wettability*, edited by J. C. Berg (Marcel Dekker Inc., New York, 1993), pp. 2-73.

## Effect of Substrate Surface Energy on Light Scattering of a Low Loss Mirror

Beom Sik Lee<sup>†</sup>, and Yeon Serk Yu

*Department of Laser and Optical Information Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: pumpsix@naver.com*

Jae-Cheul Lee, and Deog Jae Hur

*Center for photonics, Institute for Advance Engineering, Youngin 449-863, KOREA*

Hyun-Ju Cho

*Department of Firearms & Optics/Daeduk college, Daejeon 305-715, KOREA*

(Received October 12, 2007, Revised manuscript November 14, 2007)

Ultra-low loss ZERODUR and fused silica mirrors were manufactured and their light scattering characteristics were investigated. For this purpose, ZERODUR and fused silica substrates were super-polished by the bowl feed method. The surface roughness were 0.292 Å and 0.326 Å in rms for ZERODUR and fused silica, respectively. To obtain the high reflectivity, 22 thin film layers of SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were deposited by Ion Beam Sputtering. The measured light scattering of ZERODUR and fused silica mirror were 30.9 ppm and 4.6 ppm, respectively. This shows that the substrate surface roughness is not the only parameter which determines the light scattering of the mirror. In order to investigate the mechanism for additional light scattering of the ZERODUR mirror, the surface roughness of the mirror was measured by AFM and was found to be 2.3 times higher than that of the fused silica mirror. It is believed that there is some mismatch at the interface between the substrate and the first thin film layer which leads to the increased mirror surface roughness. To clarify this, the contact angle measurements were performed by SEO 300A, based on the Giriflaco-Good-Fowkes-Young method. The fused silica substrates with 0.46 Å in its physical surface roughness shows lower contact angle than that of the ZERODUR substrate with 0.31 Å. This indicates that the thin film surface roughness is determined by not only its surface roughness but also the surface energy of the substrate, which depends on the chemical composition or crystalline orientation of the materials. The surface energy of each substrate was calculated from a contact angle measurement, and it shows that the higher the surface energy of the substrate, the better the surface roughness of the thin film.