

기판의 표면거칠기와 반사경 산란에 대한 연구

조현주[†] · 신명진 · 이재철

고등기술연구원 포토닉스 및 통신기술 센터

☎ 449-863 경기도 용인시 백암면 고안리 633-2

(2002년 1월 24일 받음, 2002년 5월 3일 수정본 받음)

기판의 표면거칠기가 반사경의 산란에 미치는 영향을 조사하였다. 기판의 표면거칠기가 다른 다섯 종류의 기판에 이온빔 스퍼터링 방법과 전자총 증착 방법으로 각각 반사율이 1에 가까운 고반사율 박막을 증착하고 산란을 TIS 방법으로 측정하였다. 기판의 표면거칠기가 2 Å 이상인 경우의 기판의 산란에 대한 반사경 산란 비율은 표면거칠기가 2 Å 미만인 경우의 산란 비율에 비하여 급격한 증가를 나타냄을 알 수 있었으며, 기판의 표면거칠기가 낮은 경우 반사경의 산란은 기판의 표면거칠기보다 반사경을 구성하는 박막의 미세구조에 의존하는 것으로 판단되었다. 한편 반사경 중에서 가장 작은 산란은 2.1 ppm 이었고, 이것은 표면거칠기 0.23 Å인 기판에 이온빔 스퍼터링 방법으로 제작되었다.

주제어 : low loss mirror, ion beam sputtering, electron beam evaporation, total integrated scattering, surface roughness.

I. 서 론

일반적으로 광학 박막 및 광학계를 구성하는 광학부품에서 빛의 산란에 의한 손실은 그 양이 매우 작아 무시되어 왔다. 그러나 고정밀 광학계로 기술이 발전하고 단파장 광학계의 사용이 늘어남에 따라 사용하는 파장에 반비례하여 증가하는 광학계의 산란은 점차 무시할 수 없는 요소가 되어가고 있다. 특히 1 마이크로미터 미만의 리소그래피(submicron lithography) 광학계, 엑스선(X-ray) 광학계 등의 경우 각 광학부품의 산란은 매우 중요하게 다루어지며 따라서 이의 정확한 측정이 요구되어지고 있다. 또한 공동 광자감쇠 분광기(cavity ring down spectroscopy),^[1,2] 중력파 측정장치,^[3] 링 레이저 자이로스코프^[4] 등에서는 수십 ppm 미만의 손실이 매우 작은 반사경이 요구되어지며 이 경우 반사경의 산란 및 흡수를 정확하게 측정하는 일은 중요하다.

광학계의 산란을 측정하는 방법에는 산란 측정장비를 사용하여 광학계의 산란을 직접 측정하는 방법과 측정면의 표면거칠기를 측정하여 이를 사용하는 파장의 산란으로 전환하는 방법이 있다. 광학면의 표면거칠기와 TIS 산란의 관계는

$$TIS = \left(\frac{4\pi\delta\cos\theta}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

로 주어지고^[5] 여기서 δ 는 rms 표면거칠기 값이며 θ 는 광학면에 입사하는 광원의 입사각이고 λ 는 TIS 측정에 사용하는 파장이다.

가장 보편화된 표면거칠기 측정 방법은 시험하고자 하는 표면을 바늘로 긁어서 표면 정보를 얻는 스타일러스(stylus) 방법이 있으나 표면거칠기가 Å 정도에 이르는 광학면의 경우 정

확한 측정이 불가능하며 시험한 표면을 손상시키는 단점도 있다. 광학적인 방법으로 표면거칠기를 측정하는 방법은 흔히 표면 조도계(surface profiler)라 불리는 위상변화 간섭계(phase shift interferometer, PSI)를 이용하여 표면의 간섭무늬를 측정하고 이를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 표면의 정보를 얻게된다. 최근 들어 폭넓게 사용되는 또 다른 방법은 원자힘 현미경(atomic force microscope, AFM)을 사용하는 방법으로 측정하고자 하는 표면과 측정기의 탐침(tip) 사이에 작용하는 반발력에 의하여 탐침이 휘는 정도를 측정하여 이를 표면 정보로 환산하는 방법이다.^[6]

광학계의 산란을 직접 측정하는 방법으로는 적분구를 사용하여 광축 방향으로 진행하는 빛 이외의 모든 빛들을 모아 광검출기로 측정하는 방법인 TIS(total integrated scattering)와 측정하고자 하는 광원으로 부터 일정한 거리 떨어진 지점에서 일정한 입체각에 입사하는 빛만을 측정각도를 변화해 가면서 측정하는 방법인 ARS(angle resolved scattering)가 있다.^[7,8]

한편 측정하고자 하는 광학면이 단일 경계면으로 구성된 경우 위에서 열거한 어떠한 방법을 사용하여도 측정이 가능하나 광학면이 광학 박막과 같이 얇은 다층 박막으로 이루어진 경우 위상변화 간섭계를 사용하여 박막의 표면거칠기를 측정하면 간섭계에 부착된 현미경의 초점 깊이(depth of focus)가 박막 각 층의 두께보다 커서 정확한 측정이 되지 않는다. 또한 광학 박막의 경우 박막의 표면 또는 각 경계면에서 발생하는 표면산란(surface scattering)과 박막 내부의 기동구조 또는 결정과 같은 구조에 의하여 산란되는 체적산란(volume scattering)이 존재하며 위상변화 간섭계를 사용한 측정의 경우 체적산란은 측정이 되지 않는다.

반사율이 높은 반사경을 제작하기 위하여 사용되는 기판은 초연마(super-polishing)된 rms 표면거칠기가 1 Å 미만인 것을 사용한다. 이는 박막이 제작되는 기저를 낮게 하여 그 위

[†]E-mail: hjcho@iae.re.kr

에 성장하는 박막의 표면거칠기가 이를 따라가도록 하기 위한 것이다. 그러나 기판의 표면거칠기와 제작된 반사경의 산란의 상관관계에 관한 것은 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 표면의 거칠기가 각각 다른 다섯 종류의 용융 실리카(fused silica) 기판을 준비하여, 두 가지 방법으로 표면을 측정하고, 이온빔 스퍼터링(ion beam sputtering, IBS) 방법과 전자총 증착 방법(electron beam evaporation, EB)으로 각각 고반사 박막을 제작한 후 광학 박막계의 표면거칠기 또는 산란을 측정하고 그 결과를 분석하였다. 따라서 기판의 표면거칠기가 반사경의 산란에 미치는 영향과 비슷한 정도의 표면거칠기를 갖는 기판에 다른 방법으로 반사경을 제작한 경우 제작 방법에서 기인하는 박막의 미세구조가 반사경의 산란에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험

2.1. 반사경 제작

실험에 사용한 기판은(General Optics) 초연마된 용융 실리카이었다. 가장 좋은 표면거칠기를 갖는 기판은 General Optics에서 제작된 기판을 바로 사용하였으며, 초연마된 기판을 입자 크기가 다른 연마용 분말(polishing power)로 재연마하여 표면 거칠기가 각각 다른 네 종류의 기판을 제작하였다. 따라서 실험에 사용된 기판은 초연마된 기판을 포함하여 5종이었다.

고반사율을 갖는 반사경을 두 가지 방법으로 제작하였다. 첫 번째 방법은 광학 박막의 제작에 많이 사용되는 전자총 증착 방법으로 He-Ne 레이저 파장에서 99.99% 이상의 고반사를 갖도록 박막을 제작하였다. 박막의 제작에는 TiO_2 와 SiO_2 를 각각 고굴절률 물질과 저굴절률 물질로 사용하였으며 박막의 증착시에 기판의 온도는 $250^\circ C$ 를 유지하였으며 TiO_2 의 증착율은 1 \AA/s 그리고 SiO_2 박막의 증착율은 20 \AA/s 를 유지하였다. 두 번째 방법으로는 박막의 미세구조가 조밀한 이온빔 스퍼터링 방법을 사용하여 고반사경을 제작하였다. 박막의 제작에 사용한 고굴절률 물질은 Ta_2O_5 이었으며 저굴절률 물질은 SiO_2 를 사용하였다. 박막은 상온에서 성장하였으며 고굴절률 물질을 스퍼터링 할 때는 Ta 표적에 800 eV의 Ar 이온 100 mA를 입사시켜 물질을 떼어내어 산소분위기 속에서 Ta_2O_5 를 제작하였으며, 저굴절률 물질은 900 eV의 Ar 이온 160 mA를 바로 SiO_2 표적에 입사시켜 증착 하였다. 각각의 물질은 중성화를 위하여 플라즈마 브릿지(plasma bridge) 중성화장치를 사용하였으며, 이때 Ta_2O_5 박막의 증착율은 0.2 \AA/s 이고 SiO_2 박막의 증착율은 0.5 \AA/s 이었다.

2.2. 산란 및 표면거칠기 측정

본 실험에서는 산란을 측정하기 위한 장비로 TIS 측정장비를 사용하였으며 기판 또는 반사경의 표면거칠기를 직접 측정하기 위한 장비로 Zygo사의 위상변화 간섭계를 사용하였다.

기판 및 박막의 산란을 측정하기 위한 방법으로 그림 1과 같은 TIS 측정장비를 구성하였다. 광원으로는 출력광의 세기가 안정화된 He-Ne 레이저(Melles Griot 05 STP 903)를 사용하였으며 이를 단속기(chopper)를 사용하여 진폭 변조한 후

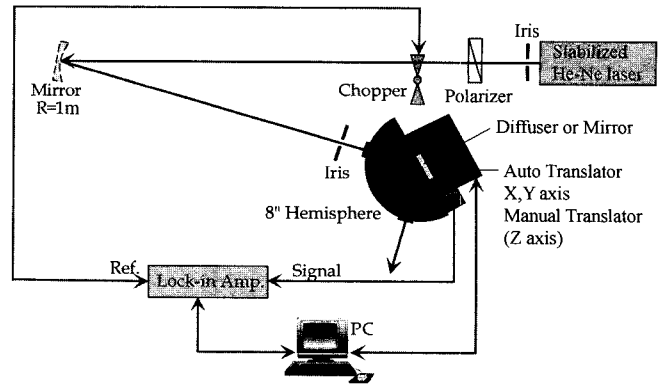


그림 1. TIS 측정장비 구성도 : 출력광의 세기가 안정화된 He-Ne 레이저와 8인치 적분반구를 사용하여 장비를 구성하였으며 잡음을 제거하기 위하여 진폭 변조된 빛이 시료 표면에 입사되도록 하였다.

측정하고자 하는 시료가 부착된 직경이 8인치인 반구형 적분구에 입사시켰다. 광축을 벗어난 산란광의 검출을 위하여 광전자 증배관(photomultiplier tube)을 사용하였다. 검출된 산란광의 세기는 표준 산란기(Labsphere)의 산란 세기에서 산란된 광의 세기 값으로 나누어 산란율을 결정하였다. 또한 측정면의 위치에 따른 산란을 측정하기 위하여 측정면이 적분구면에 닿은 상태에서 일정부분 움직일 수 있도록 이송장치를 부착하였으며 이를 컴퓨터와 연결하여 위치에 따른 산란을 측정할 수 있도록 구성하였다.

측정 장치의 가장 중요한 절차는 빛의 변조를 위하여 사용한 단속기에 의하여 레이저 빛의 끝 부분이 꼬리를 갖는 형태를 유지하게 되는데 이를 적절히 제거하는 방법과 시료에 입사한 빛이 측정면을 지나 뒷면에 입사한 경우 뒷면의 산란에 의하여 산란 신호가 간섭받는 현상을 제거하는 것이다. 특히 기판의 산란을 측정하는 경우에는 기판의 뒷면에 입사하는 빛과 측정면에 입사하는 빛의 세기가 거의 유사하고 따라서 뒷면에서 발생하는 산란이 측정면의 산란에 많은 영향을 주었다. 설치된 측정장비의 전자잡음은 0.1 ppm이었고 광학잡음은 0.5 ppm이었다. 한편 뒷면 반사에 의한 영향을 제거하기 위하여 무광택 페인트, 굴절률 정합 기름(index matching oil) 등을 기판의 뒷면에 바르고 측정을 시도하였으나 측정되는 산란값이 급격히 증가하는 결과를 나타내어 이 방법을 본 측정에서는 사용하지 않았다.

본 실험에서는 위상변화 간섭계(Maxim GP, Zygo)를 사용하여 표면거칠기를 측정하였다. 표면거칠기는 기판뿐만 아니라 제작된 반사경에 대하여도 측정을 수행하였다. 빛의 간섭현상을 이용하여 기준면과 측정면의 간섭무늬를 만들고 이로부터 측정면의 거칠기 정보를 얻어내는 표면 조도계는 경계면이 여러 개인 반사경의 경우 정확한 표면거칠기 측정이 불가능하다. 이를 본 실험에서 사용한 표면 조도계 제작사인 Zygo사에 문의한 결과 본 실험에서 사용한 장비의 경우 초점깊이가 $10 \mu m$ 이었다. 이는 제작된 반사경의 전체 두께보다 큰 양으로 각 경계면에서의 반사가 반사경의 표면거칠기 측정에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

III. 결과 및 논의

그림 2는 위상변화 간섭계를 사용하여 측정된 기관의 표면 거칠기에 대한 TIS 산란을 측정하여 식 (1)을 사용하여 계산한 기관의 표면거칠기를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 간섭계를 사용한 측정과 TIS로 측정하여 환산한 표면거칠기가 직선 (a)와 같이 선형적인 변화를 보이고 있으나 TIS 산란으로 환산한 표면거칠기가 위상변화 간섭계로 측정된 표면거칠기에 비하여 약 1.73배의 값을 나타내고 있으며 중간부분에서 선형을 많이 벗어난다. 이러한 결과는 TIS 측정시 기관 뒷면에서 산란된 빛이 다시 적분구로 되돌아와 기관의 산란에 포함되어 측정된 결과로 판단된다. 그림에서 (b)로 표시된 점선으로 선형 맞춤한 결과는 기관의 표면거칠기가 작은 기관과 표면거칠기가 큰 기관을 제외한 기관들을 선형 맞춤한 결과로 전체를 선형 맞춤한 결과보다 선형성이 우수하였으며 위상변화 간섭계의 측정에 비하여 2.95배의 표면거칠기를 갖는 것으로 나타났다.

그림 3은 TIS 측정에서 발생하는 기관의 뒷면효과를 도식적으로 나타낸 그림이다. 반사율이 낮은 박막이나 기관의 산란을 측정하는 경우 측정면에서의 빛의 세기와 뒷면에서의 빛의 세기가 거의 유사하고 따라서 뒷면에서 산란된 빛이 다시 적분구 안쪽으로 되돌아오는 빛이 TIS 측정에 크게 영향을 주게된다. 기관의 표면거칠기가 매우 작은 초연마 기관의 경우(그림 3(a)) 측정면에서의 산란값이 뒷면에서의 산란값에 비하여 매우 작으므로 TIS 측정에서 뒷면의 영향은 더욱 크게 나타난다. 따라서 TIS를 이용한 표면거칠기의 계산값은 다른 값에 비하여 크게 측정되는 것으로 판단된다. 이와는 반대로 기관의 표면거칠기가 큰 기관의 경우(그림 3(c)) 뒷면에서 산란되는 빛의 영향이 측정면에 비하여 상대적으로 작음으로 인하여 TIS에서 계산된 표면거칠기가 다른 기관에 비하여 상대적으로 낮은 값을 나타내는 것으로 보인다. 이들을 제외한 일반

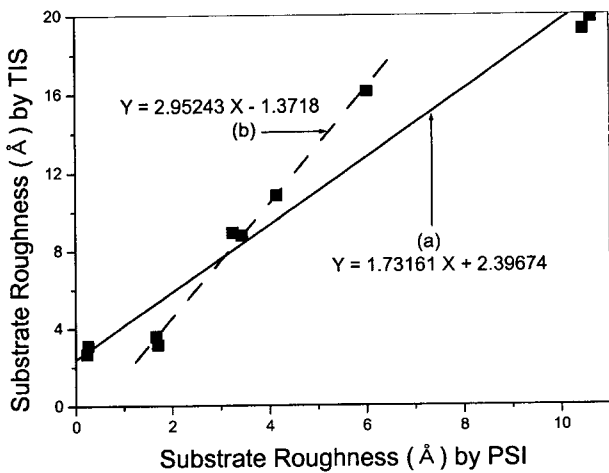


그림 2. 위상변화 간섭계(PSI)를 사용하여 측정된 기관의 표면거칠기에 대한 TIS 산란을 측정하여 계산된 기관의 표면거칠기 : 표면거칠기가 작은 기관과 큰 기관들을 포함한 선형 맞춤 결과[직선 (a)]에 비하여 이들을 제거한 결과[직선 (b)]가 선형성이 우수하다.

전인 기관의 경우(그림 3(b)) 기관의 앞면과 뒷면이 TIS 측정에 유사한 영향을 미치게 되므로 TIS 측정으로 환산한 기관의 표면거칠기가 위상변화 간섭계를 이용하여 측정된 표면거칠기보다 약 2배의 값을 나타낼 것으로 예상되었으나 그 결과는 그림 2의 직선 (b)와 같이 약 3배를 나타내었다.

한편 측정면의 반사율이 높은 고반사경의 산란을 측정하는 경우에는 뒷면에 도달하는 빛의 세기가 측정면에 비하여 매우 낮고 또한 뒷면에서 산란된 빛이 적분구로 되돌아가는 과정에서 다시 한번 높은 반사율을 경험하게 되므로 뒷면의 산란이 측정값에 미치는 영향이 상대적으로 작다.

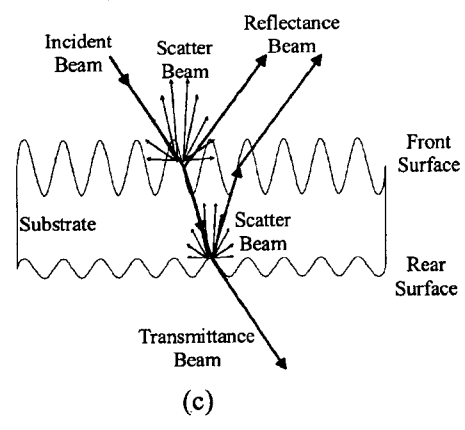
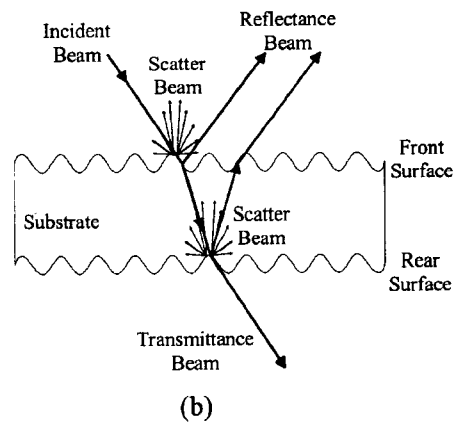
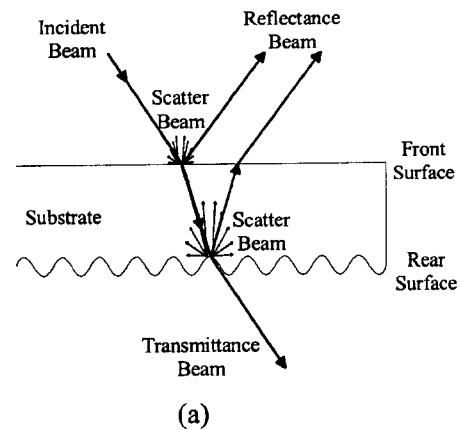


그림 3. 기관의 앞면 표면거칠기에 따른 TIS 측정에서의 뒷면효과 (a) 초연마 기관, (b) 일반연마 기관, (c) 거친연마 기관.

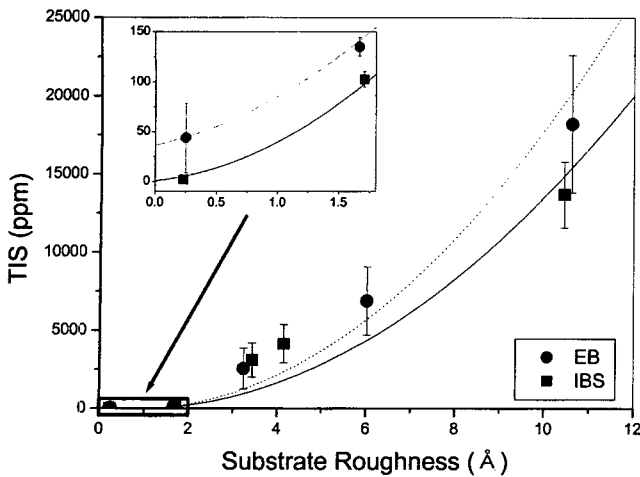


그림 4. 이온빔 스퍼터링 방법 및 전자총 증착방법으로 제작된 반사경의 기관 표면거칠기에 따른 TIS 산란 : 유사한 표면거칠기를 갖는 기관을 사용한 경우 이온빔 스퍼터링 방법으로 제작된 반사경의 산란이 전자총 증착방법으로 제작된 반사경의 산란에 비하여 낮음을 알 수 있다.

그림 4는 기관의 표면거칠기에 따른 각 증착방법에서의 박막의 TIS 산란을 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 기관의 표면거칠기가 증가함에 따라 박막의 TIS 산란은 증가하는 경향을 나타내었다. 유사한 표면거칠기를 갖는 기관을 사용하여 제작한 반사경의 산란은 이온빔 스퍼터링 방법으로 제작된 반사경의 산란에 비하여 낮게 나타났으며 이는 박막의 제작방법에 따른 미세구조의 차이에서 기인하는 현상으로 판단된다. 일반적으로 전자총 증착 방법을 사용하여 증착되는 박막의 경우 박막에 입사되는 입자의 운동에너지가 0.1 eV 정도로 낮아 박막은 기둥구조로 성장된다.^[9] 반면 이온빔 스퍼터링을 사용하여 제작되는 박막의 경우 기관에 입사하는 증착입자의 에너지가 수십 eV 이상이 되며 이러한 높은 운동에너지에 의하여 기둥구조가 없는 조밀한 박막이 성장된다.^[10] 따라서 전자총 증착 방법을 사용한 반사경의 경우 기둥구조로 박막이 형성되었다면, 그 속을 진행하는 빛이 격계되는 체적산란은 기둥과 빈공간 사이를 진행하면서 많은 경계면을 만나게되며 이로 인하여 이온빔 스퍼터링 반사경에 비하여 높은 산란을 나타내는 것으로 판단된다.

그림 4에 각 반사경의 위치에 따른 산란 변화폭을 막대오차 형태로 표현하였다. 전반적으로 이온빔 스퍼터링으로 제작된 반사경의 산란 변화폭이 전자총 증착방법으로 제작된 반사경의 산란폭에 비하여 작음을 알 수 있는데, 이 역시 반사경의 미세구조에 따른 영향으로 판단된다. 즉, 반사경 내부에 기둥구조가 존재하는 경우 기둥과 빈공간이 연결되는 형식으로 나타나는 표면은 그렇지 않은 경우에 비하여 심한 표면의 굴곡을 나타내게 되므로 반사경의 TIS 산란을 위치를 변화시키면서 측정하는 경우 그 값의 변화가 기둥구조가 없는 반사경에 비하여 크게 나타나는 것으로 보인다.

식 (1)에 의하면 반사경의 TIS 산란과 기관의 표면거칠기는 제품에 비례하는 관계를 갖는다. 그림 4의 결과를 바탕으로 이

를 2차 함수로 곡선 맞춤한 결과를 보면 기관의 표면거칠기가 2 Å 미만인 영역에서는 비교적 곡선과 각 점이 잘 일치하는 반면 기관의 표면거칠기가 2 Å 이상의 영역에서는 TIS 산란값이 일치하지 않으며, 특히 기관의 표면거칠기가 10 Å 이상인 경우를 제외하면 대부분의 경우 곡선보다 높은 산란을 나타냄을 알 수 있다. 또한 각 증착 방법에 따른 곡선 맞춤의 결과를 비교하여 보면 전자총 증착방법의 곡선맞춤 결과가 이온빔 스퍼터링 방법의 곡선에 비하여 높은 산란을 나타내고 있으며, 이는 앞서 언급한 체적산란에 의한 효과가 곡선맞춤에서도 반영된 것으로 해석된다.

한편 기관의 표면거칠기가 2 Å 미만인 영역에서의 기관의 표면거칠기에 대한 반사경의 TIS 산란비와 기관의 표면거칠기가 2 Å 이상인 영역에서의 기관의 상태에 따른 반사경의 TIS 산란 비율은 다른 경향을 나타내었다. 즉 기관의 표면거칠기가 좋은 경우 반사경의 산란은 상대적으로 낮은 비율로 증가한 반면 기관의 표면거칠기가 나쁜 경우 반사경의 산란 증가는 상대적으로 높았다. 이는 기관의 표면거칠기가 증착 입자의 크기와 유사하거나 작은 경우 반사경의 표면은 주로 증착 입자에 의하여 결정되는 반면 기관의 표면거칠기가 큰 경우 증착 입자는 기관의 큰 굴곡을 따라가면서 성장하여 제작된 반사경의 표면거칠기가 더욱 커지면서 나타나는 결과로 판단된다.

표 1은 기관의 산란과 반사경의 산란 그리고 이들 사이의 상대적인 산란 증가율을 나타낸다. 반사경을 제작한 두 방법 모두에서 기관의 산란이 2 Å 미만인 경우 기관에 대한 반사경의 산란증가 비율이 265% 이하로 낮은 반면 기관의 표면거칠기가 2 Å 이상인 경우 기관에 대한 반사경의 산란 비율을 670%에서 1173% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 산란이 작은 반사경의 제작을 위해서는 표면거칠기가 2 Å 미만인 기관을 사용하여야 반사경 제작후의 산란 증가율을 현저히 줄일 수 있다. 한편 이온빔 스퍼터링 방법으로 기관의 표면거칠기가 0.23 Å인 기관에 제작된 반사경의 경우 반사경의 산란이 기관의 산란에 비하여 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 기관의 산란 측정시에 발생하는 뒷면 산란효과에 대한 오차가 영향을 준 것으로 판단된다. 유사한 표면거칠기를 갖

표 1. 제작된 반사경의 기관에 대한 TIS 산란 증가 : 기관의 표면 거칠기가 2 Å 이상인 경우 기관에 대한 반사경의 산란 증가율이 급격히 증가함을 알 수 있다

	Substrate Roughness (Å)	Substrate TIS (ppm)	Mirror TIS (ppm)	ratio (%)
Ion beam sputtering (IBS)	0.23	28.0	2.1	7.3
	1.70	38.9	102.9	164.4
	3.43	304.5	3098.0	1017.4
	4.15	462.8	4144.0	895.4
	10.45	1460.0	13695.0	938.0
Electron beam evaporation (EB)	0.25	38.1	43.9	115.1
	1.67	51.0	135.2	265.0
	3.24	314.5	2555.0	812.6
	6.02	1027.5	6892.0	670.7
	10.62	1552.4	18219.0	1173.6

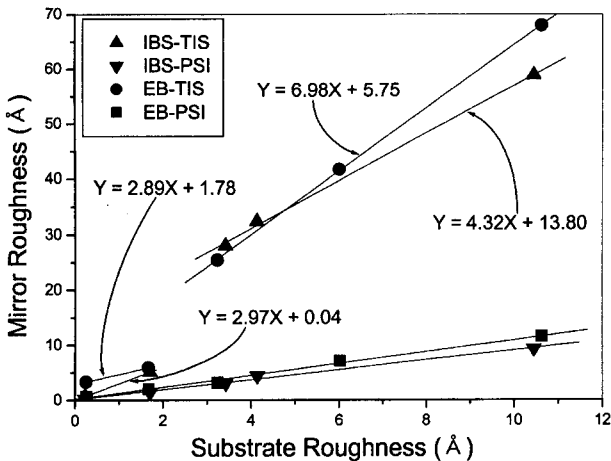


그림 5. 위상변화 간섭계(PSI) 및 TIS 산란측정으로부터 계산된 증착 방법의 기관 표면거칠기에 대한 반사경의 표면거칠기 : 위상변화 간섭계를 사용하여 측정된 반사경의 표면거칠기에 비하여 TIS 산란을 측정하여 계산된 반사경의 표면거칠기가 현저히 크게 나타남을 알 수 있다.

는 기관에 증착된 전자총 증착 반사경의 경우 반사경을 구성하는 내부의 기둥구조에 의한 산란증가가 뒷면효과에 의하여 발생하는 오차 증가율 보다 크기 때문에 기관의 산란에 비하여 반사경의 산란이 크게 측정된 것으로 판단된다.

그림 5는 위상변화 간섭계 및 TIS 측정으로부터 계산된 증착방법에 따른 기관의 표면거칠기에 대한 반사경의 표면거칠기이다. 위상변화 간섭계를 사용하여 측정된 반사경의 표면거칠기에 비하여 TIS 산란을 측정하여 계산된 반사경의 표면거칠기가 크게 나타남을 알 수 있다. 위상변화 간섭계를 사용한 측정이 TIS 산란을 사용한 측정에 비하여 작은 값을 나타내는 이유는 ① 위상변화 간섭계를 사용하여 반사경의 표면거칠기를 측정하는 경우 위상변화 간섭계의 초점깊이가 10 μm이므로 반사경을 이루고 있는 유전체 다층박막의 각 경계면에서 나타나는 간섭의 효과로 인한 측정의 부정확성과 ② 위상변화 간섭계를 사용한 측정의 경우 박막의 내부에서 발생하는 체적 산란을 감지하지 못하는 점을 들 수 있다. 따라서 다층박막으로 구성된 반사경의 산란에 관한 정보를 얻기 위해서는 위상변화 간섭계를 사용하는 것보다 TIS 산란을 측정하는 방법이 유용한 것으로 판단되며 특히 반사경의 경우 기관의 측정과는 달리 TIS 측정에서 뒷면의 효과가 급격하게 반감됨으로 인하여 그 신뢰성이 더욱 확보된다. 이러한 결과는 Zygo사와의 개인적인 접촉에 의하여서도 확인되었으며 Zygo사의 전문가는 다층박막의 경우 위상변화 간섭계를 사용하여 표면정보의 신뢰할 만한 값을 얻기는 어려우나 측정면 상단에 입사하는 위상변화 간섭계 빛의 조도를 일정하게 유지함으로써 반복적인 값의 측정은 가능하다고 하였고^[11] 본 측정에서도 그 결과를 확인하였다.

한편 동일한 방법으로 제작된 반사경의 TIS 측정으로부터 계산된 표면거칠기는 기관의 표면거칠기에 따라 급격한 변화를 보이고 있다. 즉 기관의 표면거칠기가 2 Å 미만인 경우 반사경의 표면거칠기 증가폭은 기울기 3 미만인 반면, 기관의

표면거칠기가 2 Å 이상인 경우 반사경의 기관에 대한 표면거칠기 증가는 이온빔 스퍼터링의 경우 4.32이고 전자총 증착방법의 경우 6.98로 급격한 상승을 보이고 있다. 따라서 산란이 작은 반사경의 제작을 위해서는 표면거칠기가 2 Å 미만인 기관을 사용하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

이온빔 스퍼터링 방법과 전자총 증착 방법을 이용하여 기관의 표면거칠기가 다른 다섯 종류의 기관에 반사경을 제작하고 기관 및 반사경의 산란과 표면거칠기를 각각 TIS 방법과 Zygo사의 위상변화 간섭계를 사용하여 측정하였다.

TIS 측정을 이용하여 계산되는 기관의 표면거칠기는 측정면 뿐만 아니라 뒷면에서의 산란이 측정값에 영향을 주어 표면거칠기가 위상변화 간섭계를 사용한 경우보다 크게 나타났으며, 특히 기관의 표면거칠기가 1 Å 미만인 초연마 기관의 경우 그 증가는 더욱 크게 나타났다. 이를 토대로 기관의 표면거칠기를 측정하는 경우 위상변화 간섭계를 사용하는 방법이 기관의 뒷면효과를 배제할 수 있어 측정의 신뢰성이 우수한 것으로 판단된다.

반면 반사경의 산란을 측정하는 경우 측정면이 높은 반사율을 갖음으로 인하여 뒷면에 도달하는 빛의 세기가 감소하고 또한 뒷면에서 산란된 빛이 다시 적분구로 돌아올 때 높은 반사율을 다시 경험하게 되므로 반사경의 산란 측정에서는 뒷면의 효과가 매우 작은 것으로 나타났다. 한편 위상변화 간섭계를 사용하여 반사경의 표면거칠기를 측정하는 경우 위상변화 간섭계의 초점깊이가 반사경을 구성하는 유전체 박막의 두께보다 매우 큼으로 인하여 반사경의 표면거칠기 측정이 신뢰성을 갖지 못하였다.

반사경의 제작 방법에 따른 산란을 측정한 결과 이온빔 스퍼터링 반사경의 경우 박막의 미세구조가 조밀함으로 인하여 박막내부에서의 체적 산란이 작아 전자총 증착 방법으로 제작된 반사경에 비하여 위치에 따른 산란의 변화가 작으며, 동일한 기관에서의 산란값이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 나타났다. 한편 기관의 표면거칠기가 2 Å 이상인 경우 기관의 산란에 대한 반사경의 산란의 비가 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 따라서 기관의 산란에 대한 반사경의 산란 증가율이 낮은 광학 박막의 제작을 위해서는 기관의 표면거칠기가 2 Å 미만인 기관을 사용함이 좋을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호: 2000-N-NL-01-C-253)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] J. W. Hahn, Y. S. Yoo, J. Y. Lee, J. W. Kim, and H. W. Lee, "Cavity ring down spectroscopy with a continuous-wave

- laser: Calculation of coupling efficiency and new spectrometer design," *Appl. Opt.* vol. 38, no 9, pp. 1859-1866, 1999.
- [2] 신명진, 조현주, 임경아, 문용권, 문건, 이재철, "공동광자 감쇠시간 측정 방법을 이용한 반사경의 손실 측정," 한국광학회지 제11권 2호, pp. 123-129, 2000.
- [3] P. Fritschel, N. Macalvala, D. Shoemaker, D. Sigg, M. Zucher, and G. Gonzalez, "Alignment of an interferometric gravitational wave detector," *Appl. Opt.* vol. 37, no. 28, pp. 6734-6747, 1998.
- [4] U. K. Schreiber, C. H. Rowe, D. N. Wright, S. J. Cooper, and G. E. Stedman, "Precision stabilization of the optical frequency in a large ring laser gyroscope," *Appl. Opt.* vol. 37, no. 36, pp. 8371-8381, 1998.
- [5] J. C. Stover, *Optical Scattering: Measurement and Analysis* (SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1995), chapter 4.
- [6] J. M. Bennett and L. Mattson, *Introduction to surface roughness and scattering* (Optical Society of America, Washington D.C., 1989), chapter 3.
- [7] 조현주, 박홍진, 황보창권, 문환구, 김진태, 손승현, 이재철, "TIS 방법을 이용한 유전체 고반사 거울의 산란 측정," 한국광학회지 제8권 4호, pp. 283-290, 1997.
- [8] C. Amra, P. Roche, and E. Pelletier, "Interface roughness cross-correlation laws deduced from scattering diagram measurements on optical multilayers: effect of the material grain size," *J. Opt. Soc. Am B* vol 4, no. 7, pp. 1087-1093, 1987.
- [9] R. Messier, A. P. Giri, and R. A. Roy, "Revised structure zone model for thin films physical structure," *J. Vac. Sci. Technol. A* vol. 2, no. 2, pp. 500-503, 1984.
- [10] S. M. Arnold and B. E. Cole, "Ion beam sputter deposition of low loss Al₂O₃ films for integrated optics," *Thin Solid Films* vol. 165, no. 1, pp. 1-9, 1988.
- [11] M. Fialho, *Personal communication* (Zygo Corporation, USA).

Effect of surface roughness onto the scattering in low loss mirrors

Hyun-Ju Cho[†], Myung-Jin Shin, and Jae-Cheul Lee

Center for Photonics & Communications, Institute for Advanced Engineering, Youngin 449-863, KOREA

[†]E-mail: hjcho@iae.re.kr

(Received January 24, 2002 ; revised manuscript received May 3, 2002)

The effect of surface roughness on mirror scattering has been studied. Five kinds of substrates with different surface roughness were fabricated. On those substrates, a dielectric multi-layer coating with high reflectivity was deposited by ion beam sputtering and electron beam evaporation. A total integrated scattering measurement set-up was built for the evaluation of deposited samples. Most of the ion beam sputtered mirrors showed lower scattering than the electron beam evaporated one, which deposited on substrates similar in surface roughness. Over $\sim 2 \text{ \AA}$ in surface roughness, scattering strongly depend on the micro-structure of the super-polished surface. The lowest scattering we have achieved is 2.06 ppm by ion beam sputtering from the substrate with surface roughness of 0.23 \AA .

Classification code : OM.020.