

공동 광자 감쇠시간 측정 방법을 이용한 반사경의 손실 측정

신명진 · 조현주 · 임경아 · 문용권 · 문 건 · 이재철

고등기술연구원 광전자팀

(2000년 1월 21일 받음, 2000년 3월 29일 수정본 받음)

흡수와 산란이 매우 작은 반사경의 손실을 측정하기 위하여 공동 광자 감쇠시간 측정 방법을 이용한 측정 장치를 구성하였다. 장치의 광자 감쇠시간의 측정 오차는 반사경의 위치에 따른 손실 불균일성으로 설명할 수 있으며 단시간 안정도와 장시간 안정도 측정을 통하여 본 장치의 장시간 안정도의 한계는 3일이고 그 때의 최소 측정 오차는 4 ppm임을 확인하였다. 또한 구성된 장치를 이용하여 제작 방법과 손실이 다른 여러 반사경의 손실을 측정할 결과 이온빔 스퍼터링 방법을 사용한 반사경이 전자총 증착 방법을 사용한 반사경에 비해 작은 손실을 가진 것을 알 수 있었으며 반사경의 손실이 측정 위치에 따라 다르게 나타나 손실이 공간적으로 균일하지 않음을 확인하였다.

I 서 론

일반적으로 단층 또는 다층으로 구성된 유전체 광학 박막은 박막의 투과 및 반사로 그 특성을 논하며 대부분의 경우 박막의 산란 및 흡수는 그 양이 매우 작아 무시하고 계산 및 평가된다. 그러나 증력과 측정 장치,^[1] 링 레이저 자이로,^[2] 광자 감쇠 분광기^[3] 등의 몇몇 광학 장치는 산란 및 흡수가 매우 작은 반사경을 요구한다. 일 예로 링 레이저 자이로에 사용되는 반사경의 산란은 반대 방향으로 진행되는 빛과 상호작용을 하여 lock-in을 발생시키며 이에 따라 링 레이저 자이로의 분해능 한계가 결정된다.

1980년대 이후 기판 가공 기술과 박막 제작 기술이 발달함에 따라 손실이 매우 작은 고반사율 거울의 제작이 가능하게 되었고 이에 따라 고반사율 측정 기술에 대한 요구가 증대되었다. 일반적으로 거울의 반사율을 측정하는 방법으로 상용화된 분광광도계(spectrophotometer)를 사용하고 있으나 분해능과 정밀도의 한계로 99.9% 이상의 반사율을 정확하게 측정하는 것은 불가능하다. 이러한 이유로 고반사율 반사경을 측정하기 위하여 위상차(phase shift angle) 측정 방법,^[4] 투과 선평(transmission line-width) 측정 방법,^[5] 공동 광자 감쇠시간(cavity ring down) 측정 방법^[6,7] 등이 제안되었다.

위상차 측정 방법은 공진기에 위상 변조된 광원을 연속적으로 입사시켜 공진 상태를 만들고 이 공진 상태가 유지된 때의 위상 변화를 측정함으로써 반사경의 손실을 결정하는 방법으로 공진기의 손실이 비교적 큰 경우 안정된 반복성을 갖고 반사경의 손실을 결정할 수 있다. 그러나 반사경의 손실이 줄어들게 되면 반사경을 포함한 공진기의 선평이 줄어들어 공진기의 공진 상태를 유지하기 위해서는 매우 안정하고 정밀한 공진 조건을 만족시켜야 하는 단점이 있다. 투과 선평 측정 방법은 광원의 선평이 공진기의 선평에 비하여 매우 작은 광원을 공진기에 입사시켜 공진된 빛의 선평을 측정함으로써 공진

기의 손실을 측정하는 방법으로 비교적 구성이 간단하다. 그러나 반사경의 손실이 매우 작은 경우 공진기에 입사하는 빛의 선평도 줄어들어야 하므로 선평이 매우 작은 레이저 광원이 필요하고 또한 측정하고자 하는 공진된 빛의 선평이 줄어들어 드는 단점이 있다.

D. Z. Anderson 등^[7]에 의해 제안된 공동 광자 감쇠시간 측정 방법은 수동 공진기에 연속 발진 레이저로 빛을 입사시켜 공진 상태를 만든 다음 공진기 감쇠시간보다 충분히 빠르게 입사광을 차단하면 공진기 안을 왕복하는 광자들은 이득을 얻지 못하고 공진기 손실에 의해 지수형태로 감쇠하게 되고 그 감쇠곡선으로부터 공진기 손실을 알아내는 것이다. 이 방법은 다른 방법에 비해 구성이 간단하고 광원의 파장과 세기 불안정성에 무관하게 신호를 얻을 수 있으며 외부 기계적 진동에 크게 민감하지 않고 간단한 계산으로 반사율을 계산할 수 있다. 또한 손실이 작은 공진기일수록 광자 감쇠시간이 길어지므로 고반사율 반사경 측정에 유리하다는 장점이 있다. 그러나 장치를 구성할 때에 공진기 감쇠를 충분히 따라갈 만큼 빠른 응답 속도의 광 검출 장치와 공진기 안에서 일어나는 Fabry-Perot 효과에 의한 출력광의 요동에 의한 영향을 줄이기 위하여 수십 ns 이하의 속도로 공진기에 입사하는 빛을 차단할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 고반사율 거울의 손실을 측정하기 위하여 공진기의 광자 감쇠시간을 측정하는 공동 광자 감쇠시간 측정 방법을 이용한 측정 장치를 구성하고 구성된 장치의 안정도를 측정하여 오차의 원인을 분석하고 최소 오차 범위를 결정하였다. 구성된 측정 장치는 s편광의 빛이 45°로 입사할 때 고반사율을 갖는 반사경을 측정하기 위한 것으로 먼저, 두 개의 반사경으로 이루어진 기준 공진기를 구성하여 공진기의 손실을 측정 후, 공진기의 길이 변화 없이 측정하고자 하는 반사경을 45°의 입사각으로 공진기 내부에 삽입하여 ‘Γ’자 형태의 측정 공진기를 구성하고 손실을 측정하여 45°입사, s편

광에 대한 반사경의 손실을 결정하도록 되어 있다. 아울러 본 연구실에서 이온빔 스퍼터링 방법과 전자총 증착 방법으로 손실이 다른 반사경을 제작하고 제작된 반사경의 손실을 구성된 장치를 이용하여 측정하고 그 결과를 분석하였다.

II. 공동 광자 감쇠시간 측정 방법에서 45° 반사경의 반사율 계산

흡수가 없는 유전체 이중박막 반사경의 광학적 특성은 기관과 박막의 굴절률에 의해 반사율(R)과 투과율(T)로 나타낼 수 있다. 그러나 실제 반사경에서는 기관과 박막의 불완전성 때문에 산란(S)과 흡수(A)에 의한 손실이 생기게 된다. 이 중 산란은 기관과 박막의 표면 거칠기, 내부 경계면, 기동구조, 불순물, 미세한 균열, 결정 등에 의해 발생되며, 흡수는 기관 및 박막을 구성하는 물질의 화학적 원소 조성비가 완전하지 못하여 박막계에 입사하는 빛에너지의 일부가 열에너지로 전환되어 일어난다. 빛이 반사경을 경할 때 겪는 이러한 과정을 에너지 보존 측면에서

$$1 = R + T + S + A$$

로 나타낼 수 있고 반사율을 제외한 나머지는 손실(L)로 정의하며 이는 반사경에 빛이 입사한 다음 광축 방향으로 되돌아 오지 않는 빛의 양을 의미한다.

$$L = 1 - R = T + S + A$$

연속 발진 레이저에 의해 계속해서 이득을 얻어 일정 세기로 공진된 빛이 광 변조기에 의해 차단된 후에는 더 이상 이득이 없이 공진기를 구성하는 손실 요인에 의해 그 세기가 점차 감쇠된다. 공진기 안에 이득 물질이 없는 상태에서의 손실 요인은 공진기 반사경의 반사율이 가장 주요하게 영향을 미친다. 공진기 안에 빛이 어떻게 감쇠 되는가를 설명하기 위하여 공진 상태에서 순간적으로 빛이 차단된 공진기를 생각하자. 일정 세기로 공진된 빛의 세기를 I_0 라 하면, 이 빛은 공진기를 구성하는 반사경 사이를 왕복하면서 시간에 따라 지수함수적으로 감쇠한다. 빛이 감쇠할 때까지 공진기를 N 번 왕복했다면 공진기를 투과하는 빛의 세기와 감쇠 계수와의 관계는

$$I_0 R^N = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 e^{-\frac{2Nd}{c\tau}}$$

로 표현되며 여기서 R 은 공진기의 총 반사율이고, 빛이 길이 d 의 공진기를 N 번 왕복할 때 걸리는 시간은 $t = \frac{N \cdot 2d}{c}$ 이다. 위 식의 양변에 로그를 취하면

$$\tau = -\frac{2d}{c \ln R} \approx -\frac{2d}{c(1-R)} = \frac{2d}{cL}$$

와 같이 표현되며 이는 광자 감쇠시간과 반사율의 관계를 표현한다.

손실 측정 장치의 기준 공진기와 측정 공진기의 개념을 그림 1에 나타내었다.

기준 공진기는 M1, M2 반사경으로 구성되고, 측정 공진기

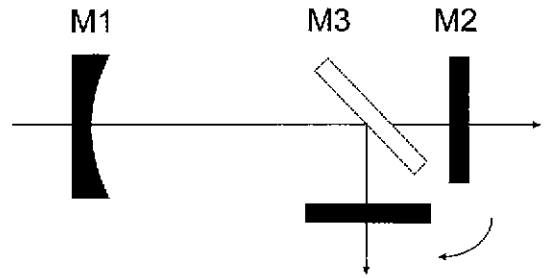


그림 1. 기준 공진기와 측정 공진기의 개념도.

는 기준 공진기의 반사경들 사이에 측정 반사경(M3)을 공진기 길이 변화 없이 45°로 삽입하여 'ㄱ'자 형태로 구성되어 있다. 공진기 총 반사율(R)은 빛이 공진기를 한 번 왕복할 때의 반사율을 의미하는데 기준 공진기를 구성하는 두 반사경의 반사율을 각각 R_1, R_2 라고 하고 측정 반사경의 반사율을 R_3 라 하면 기준 공진기의 총 반사율 R_r 은 $R_r = R_1 R_2$ 이고, 측정 공진기의 총 반사율 R_t 는 $R_t = R_1 R_2 R_3^2$ 로 표현된다. 측정 반사경의 반사율을 구하기 위하여 두 공진기의 총 반사율을 측정 양인 각 공진기의 광자 감쇠시간으로 표현하고 두 식을 소거하면

$$R_r = 1 - \frac{2d}{c} \frac{1}{\tau_r} = R_1 R_2$$

$$R_t = 1 - \frac{2d}{c} \frac{1}{\tau_t} = R_1 R_2 R_3^2$$

$$R_3^2 = \frac{R_t}{R_r} = \frac{1 - \frac{2d}{c} \frac{1}{\tau_t}}{1 - \frac{2d}{c} \frac{1}{\tau_r}} = \frac{\frac{1}{\tau_t} - \frac{c}{2d}}{\frac{1}{\tau_r} - \frac{c}{2d}}$$

$$\therefore R_3 = \sqrt{\frac{\frac{1}{\tau_t} - \frac{c}{2d}}{\frac{1}{\tau_r} - \frac{c}{2d}}}$$

로 표현된다. 여기서 τ_r 과 τ_t 는 각각 기준 공진기와 측정 공진기의 광자 감쇠시간이다. 한편 R_3 의 측정 오차(δR_3)는 오차의 전파에 의해 측정값인 τ_r 과 τ_t 의 변화량의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$2R_3 |\delta R_3| = \left| \frac{-\frac{1}{\tau_t^2}}{\frac{1}{\tau_r} - \frac{c}{2d}} \right| |\delta \tau_t| + \left| \frac{\frac{1}{\tau_t} - \frac{c}{2d}}{\left(\frac{1}{\tau_r} - \frac{c}{2d}\right)^2} \right| \left| -\frac{1}{\tau_r^2} \right| |\delta \tau_r|$$

III. 실험

3.1. 반사경 손실 측정 장치

그림 2는 반사경의 손실을 측정하기 위하여 본 연구실에서 구성한 반사율 측정 장치의 장치도이다. 이 장치는 크게 광원 및 광원을 차단하는데 사용하는 광 변조기, 기준 및 측정 반사경을 포함하는 공진기, 공진기를 투과하는 빛의 세기를 검

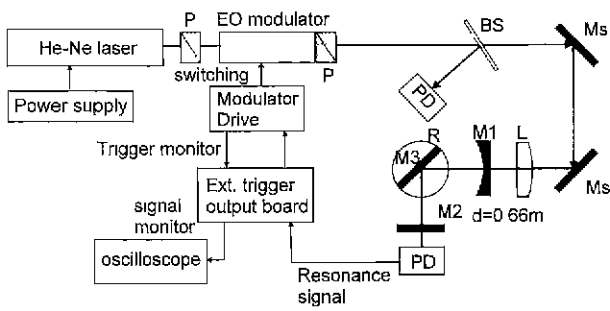


그림 2. 공동 광자 감쇠 방법을 이용한 45° 입사 반사경의 손실 측정 장치.

출하는 광 검출기로 나눌 수 있다. 광원으로는 파장이 632.8 nm이고 출력이 7mW인 선형 편광된 헬륨 네온 레이저(Melles-Griot:05 LHP 171)를 사용하였고 공진기에 입사되는 빛을 순간적으로 차단시키기 위해 스위칭 시간이 11ns인 전기광학 변조기(Quantum Technology Inc. Model 26-50)를 사용하였다. 전기광학 변조기 앞에는 Glan-Laser 편광자를 두고 변조기 뒤에는 편광 광속 분리기를 놓아 전기광학 변조기의 광축을 정렬하여 변조기로 빛을 차단했을 때 소멸비가 300:1 이상이 되도록 하였다.

45° 반사경을 측정하기 위한 기준 공진기는 곡률 반경 1m의 구면경(plano-concave)과 평면경(plane-parallel)을 사용하여 길이 66cm의 반구형 공진기로 구성하였다. 이 때 사용한 구면경과 평면경은 투과가 대략 140 ppm과 55 ppm이고 두 반사경의 산란 및 흡수를 합한 양이 118 ppm 정도 되는 것이다. 또한 공진기 내부에서 빛이 TEM₀₀ 모드로 공진하도록 하기 위하여 공진기 앞에 초점거리 600 mm의 모드 결합용 렌즈를 두었다. 측정 공진기는 기준 공진기의 반사경 사이에 측정 반사경을 입사각 45°로 삽입한 것으로 공진기 길이를 기준 공진기와 동일하게 유지하기 위하여 기준 공진기의 평면경과 측정 반사경을 회전판 위에 한 몸체로 올리고 측정 반사경을 중심으로 회전하도록 하였으며 측정 반사경은 쉽게 탈착 할 수 있도록 하였다.

공진 세기 측정을 위한 광 검출 장치는 응답 시간이 3ns인 실리콘 다이오드 형태의 광 검출기(New Focus 1801)를 사용하였고 trigger 출력 회로를 구성하여 공진기에서 나온 빛이 일정 세기 이상 되었을 때 trigger 신호를 발생시켜 전기광학 변조기에 순간적으로 전압을 공급하여 빛을 차단하도록 하였다. 광 검출기로 신호를 받을 때 측정 신호의 세기가 검출기의 선형 측정 범위를 넘지 않도록 하기 위해 검출기 앞에 ND 필터를 두어 입력 세기를 조절하였다. 또한 변조기 뒤에 beam sampler를 두어 변조기의 차단 정도를 관찰하며 조절해 주었고 공기의 흐름에 의한 진동을 차단하기 위하여 광학 장치들을 폐쇄된 상자 안에 설치하였다.

반사율 측정은 측정한 감쇠곡선을 시간에 따라 평균하여 최소 자승법으로 곡선 맞춤 하였다. 그림 3과 그림 4는 기준 공진기와 측정 공진기에서 측정된 감쇠 그래프이다. 보이는 바와 같이 측정된 감쇠곡선을 지수 함수로 곡선 맞춤 하였을 때 측정 시간을 받은 데이터와 곡선 맞춤한 결과의 차이를 나타

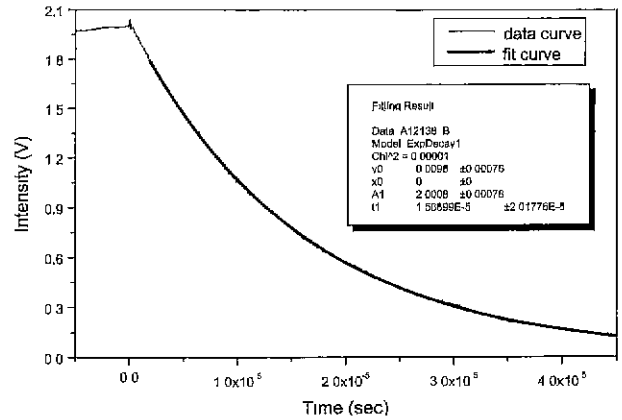


그림 3. 기준 공진기의 감쇠곡선.

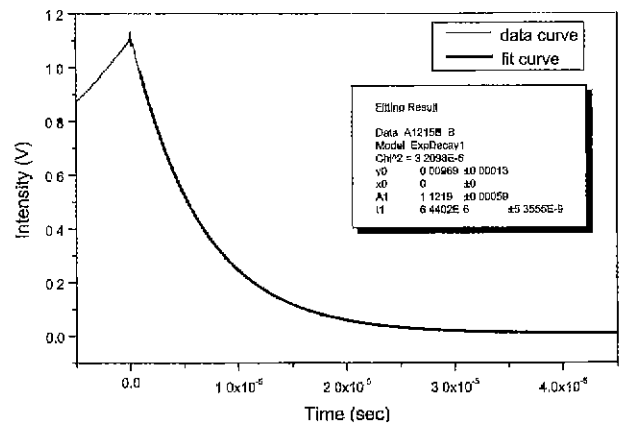


그림 4. 측정 공진기의 감쇠곡선.

내는 χ^2 값이 0.00005 이내로 지수함수와 잘 일치함을 볼 수 있고 기준 공진기에 비해 측정 반사경이 하나 더 삽입된 측정 공진기의 경우 공진기의 손실이 커짐으로 인해 그래프가 빠른 속도로 감소함을 볼 수 있다.

3.2. 반사경의 제작 및 손실 측정

반사경은 전통적인 광학 박막 제작 방법인 전자총 증착(EV/B) 방법과 조밀한 미세 구조를 갖는 박막을 제작할 수 있는 이온빔 스퍼터링(IBS) 방법으로 각각 제작하였다. 박막의 제작에 사용된 기판은 모두 기판의 표면 거칠기가 1 Å 미만인 super-polishing된 fused silica 기판(General Optics)을 사용하였으며 암모니아 용액을 사용한 화학 세척과 기판의 미세 먼지를 제거하기 위한 회전 세척 공정을 수행한 후 기판을 챔버에 장착하여 박막을 제작하였다.

이온빔 스퍼터링 방법의 경우 Ta₂O₅(M)와 SiO₂(L)를 각각 고굴절률 물질과 저굴절률 물질로 사용하여

$$\text{substrate} \text{-(ML)}^x \text{L} \text{air}$$

의 구조로 기준파장 695 nm에서 제작하였다. 모든 반사경은 상온에서 제작하였으며 Ta와 SiO₂ 타깃을 800 eV와 900 eV의 아르곤 이온빔으로 각각 스퍼터링하는 방법을 사용하였고 이 때 고굴절률 물질의 증착률은 0.22 Å/s였으며 저굴절률 물질

의 증착률은 0.55 Å/s이었고 적당량의 산소를 챔버에 주입하여 박막의 원소 조성비를 조정하였다.

전자총 증착 방법의 경우에는 두 개의 전자총에 TiO₂(H)와 SiO₂(L)를 각각 넣고 기판 온도 250°C에서

$$\text{substrate} | (HL)^n L | \text{air}$$

의 구조로 박막을 제작하였으며 이때 고굴절률 물질의 증착률은 1.5 Å/s였으며 저굴절률 물질의 증착률은 20 Å/s이었고 박막의 두께는 투과형 광학적 두께 조절기를 사용하여 조절하였다. 앞의 식에서 x, y 는 정수를 나타낸다.

반사경의 손실은 기준 공진기와 측정 공진기를 구성한 후 각각 4개의 감쇠곡선을 측정하여 결정하였다. 측정 반사경의 위치에 따른 손실의 변화를 고려하여 모든 측정은 반사경의 중앙에서 측정한 값을 기준으로 하였으며 중앙으로부터 오른쪽과 아래쪽으로 약 0.6 mm 벗어난 지점의 손실을 측정하여 비교 데이터로 사용하였다.

IV. 결과 및 논의

4.1. 측정 장치의 측정 오차

반사경 손실 측정 장치의 신뢰도는 한 반사경을 여러 번 측정했을 때 반사경의 손실이 얼마나 일관성 있게 나오는 가로 말할 수 있다. 본 측정 장치는 반사경의 손실을 얻기 위해서 기준 공진기와 측정 공진기의 광자 감쇠시간을 측정해야 하므로 장치의 신뢰도는 두 측정값의 오차에 의해 결정된다 실제로 공진기를 구성하고 감쇠곡선을 측정할 때 측정 곡선이 정확하게 같은 형태를 그리지 않는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 측정 곡선의 흔들림이 측정 오차로 작용하므로 장치의 오차 범위를 결정하기 위하여 기준 공진기와 측정 공진기의 단시간 안정도와 장시간 안정도를 측정하였다. 그런데 측정 공진기의 안정도를 측정할 때에는 공진기에 포함된 측정 반사경의 품질에 의한 효과가 최소화되어야 하므로 현미경 관찰과 손실 측정 결과를 토대로 위치에 따른 손실 변화가 비교적 적고 전반적인 손실이 다른 두 종류의 반사경에 대하여 안정도 실험을 하였다. 또한 공기의 흐름에 의해 먼지 입자들이 불규칙적으로 영향을 미치는 것을 막기 위해 공진기를 구성한 뒤에는 측정이 끝날 때까지 측정 장치의 폐쇄 상자를 닫아 두었다.

표 1은 기준 공진기와 측정 공진기의 광자 감쇠시간의 단시간 안정도 및 장시간 안정도를 측정한 결과이다. 각 공진기의 1일의 결과는 64개의 광자 감쇠곡선을 연속하여 얻은 후 시간에 대하여 평균을 취하여 곡선 맞춤한 결과로 장치의 단시간 안정도를 나타낸다. 또, 장시간 안정도를 보기 위하여 공진기에 어떤 변화도 가하지 않고 6일 동안 매일 24개의 광자 감쇠곡선을 측정하고 그 결과를 시간에 따라 평균하고 곡선 맞춤하여 감쇠시간을 구하였다. 또, 6일 동안의 기준 공진기의 평균 감쇠곡선의 곡선 맞춤 결과를 이용하여 각 측정 반사경의 감쇠시간으로부터 측정 반사경의 손실을 구하였다. 표 1의 결과를 보면 공진기로부터 감쇠곡선을 얻어 곡선 맞춤할 경우 측정값이 0.01% 이내로 감쇠 함수를 따라 가고 있으나 시간이 지날수록 평균 감쇠시간이 짧아지고 있으며 4일 이후에는 측정 공진기의 감쇠시간이 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 4일 이후에는 반사경의 오염에 의한 공진기 손실 증가로 더 이상 의미 있는 결과를 얻을 수 없다는 것을 나타낸다.

이 결과로부터 손실 측정 장치의 오차 범위를 분석하기 위해 감쇠시간에 영향을 줄 수 있는 요인인 공진기 내부 손실과 공진기 길이 변화에 대해 생각해 보았다. 공진기 내부의 손실은 장기적으로 공진기를 구성하는 반사경들의 오염에 의해 증가하기도 하고 레이저빔의 조사 방향이 변함으로 인해 반사경 위의 공진 위치가 변하면서 변화가 생길 수 있다. 또, 단기적으로 잘못된 공진기 정렬로 공진 위치가 움직이면서 생길 수 있다. 현 손실 측정 장치의 기준 공진기는 공진 가능성을 높이기 위해 곡률 반경이 비교적 큰 구면경을 사용하여 공진기를 구성하였기 때문에 공진 위치 변화의 가능성이 높아졌다고 할 수 있다. 이러한 공진 위치의 변화는 반사경의 위치에 따라 손실이 다른 경우, 손실 측정 장치에서 측정되는 감쇠시간도 달라질 것이라고 예상된다. 또, 공진기 길이 변화의 경우 측정 장치가 폐쇄 상자 안에 설치되어 있지만 대기 중에 노출된 열린 공진기이기 때문에 공기의 흐름이나 광학 테이블의 진동에 의해 각 부품의 흔들림이 미세한 길이 변화를 가져와서 감쇠시간에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

위에서 예상한 두 요인 중 손실 측정값에 영향을 미치는 오차 요인을 분석하기 위해 표 1에서 의미 있는 값이라고 판단되는 3일 간의 측정값을 토대로 측정 장치의 실질적인 오차원

표 1. 기준 공진기와 측정 공진기 감쇠시간의 단시간 안정도와 장시간 안정도 측정

	기준 공진기	측정 공진기 1		측정 공진기 2	
	감쇠시간 (μs)	감쇠시간 (μs)	손실 (ppm)	감쇠시간 (μs)	손실 (ppm)
1일	13.950±0.0098 (0.07%)	11.884±0.0095 (0.08%)	29	6.047±0.0058 (0.09%)	208
2일	13.707±0.0091	12.285±0.0092	23	6.058±0.0069	207
3일	14.253±0.0094	11.986±0.0090	27	6.014±0.0063	210
4일	14.520±0.0098	11.583±0.0086	34	5.812±0.0077	222
5일	14.088±0.0010	11.141±0.0092	41	5.900±0.0072	217
6일	14.062±0.0010	11.054±0.0084	43	5.754±0.0052	226
전체	14.091±0.0092 (0.07%)	11.663±0.0095 (0.08%)		5.8277±0.0041 (0.08%)	

*측정 공진기 감쇠시간 1 : 측정용 반사경으로 손실 약 30 ppm인 반사경 사용

*측정 공진기 감쇠시간 2 : 측정용 반사경으로 손실 약 210 ppm인 반사경 사용

표 2. 1일부터 3일까지 측정 결과의 평균과 오차를 공진 길이 변화와 공진기의 손실 변화 관점에서 계산한 결과

	공진기 감쇠시간 (μs)	공진기 손실 (ppm)	δd (mm)	δL (ppm)
기준 공진기	13.970 \pm 0.274	315	12.9	6.2
측정 공진기 1	12.052 \pm 0.208	365	11.4	6.3
측정 공진기 2	6.040 \pm 0.023	728	2.5	2.8

*측정 공진기 1의 반사경 손실 : 25 \pm 6 ppm
 *측정 공진기 2의 반사경 손실 : 207 \pm 4 ppm

이 공진기 내부의 손실 변화라고 생각했을 경우와 공진기 길이 변화라고 생각했을 경우 각각에 대하여 계산하였다.

앞에서 언급한 감쇠시간과 공진기 길이 그리고 공진기 손실 간의 관계식 $\tau = 2d/Lc$ 에서 감쇠시간 오차를 공기 흐름에 의한 공진기 길이 변화로 생각하여 측정량으로 나타내면 $\delta d = \frac{d}{\tau} \delta \tau$ 로 표현할 수 있고, 반사경의 위치에 따른 손실 변화로 생각할 경우는 $\delta L = \frac{2d}{c\tau^2} \delta \tau$ 로 표현할 수 있다. 앞의 두 식에 표 1에 있는 3일 간의 감쇠 시간 측정 결과의 평균과 오차를 대입하면 표 2의 결과를 얻는다. 계산 결과에 의하면 기준 공진기에서 발생한 감쇠시간 오차가 모두 공진기 길이 변화에서 기인한 것으로 생각할 경우 공진기 길이는 약 13 mm가 변해야 함을 의미한다. 그러나 계산에 사용한 값은 공진기에 어떠한 변화도 가하지 않은 상태에서 측정한 것으로 광학 지지대 위에 설치된 광학계의 진동에서 나타날 수 있는 길이 변화로 생각하기에는 매우 큰 양이다. 그리고 공진기 손실 변화로 생각할 경우에는 6.2 ppm의 변화로 계산되었는데 이것은 공진기를 구성하는 반사경의 위치에 대한 손실 변화로 해석하기 가능한 양으로 생각된다. 따라서 대부분의 감쇠시간에 대한 측정 오차는 광학계의 진동에 의한 공진기 길이 변화가 아니라 공진기의 손실 즉, 공진기를 구성하는 반사경의 손실이 공진 위치에 따라 변하는 반사경의 손실 불균일성에서 기인하는 것으로 판단된다.

또한 일별 감쇠시간의 오차에 비하여 감쇠시간이 불균일하고 크게 변하는 이유는 레이저빔의 조사 방향(pointing direction)이 시간에 따라 변하여 공진하는 위치가 변화하기 때문으로 판단되며 6일 간의 감쇠시간 측정에서 전체적으로 감쇠시간이 줄어드는 이유는 반사경의 오염으로 판단되어 장치의 장시간 안정도의 한계는 3일이라고 할 수 있다. 구성된 장치의 감쇠시간 측정 오차는 반사경의 손실이 위치에 따라 불균일한 정도와 반사경의 오염 상태에 좌우됨을 알 수 있고 현재 장치의 최소 측정 오차는 측정 공진기 2에서 얻은 약 4 ppm 정도라 할 수 있다.

4.2. 반사경 손실 평가

일반적으로 저손실 반사경을 제작하기 위한 박막은 막의 결정 구조에 의해 산란되는 빛을 줄이기 위하여 결정이 없는 비정질 물질을 많이 사용한다. 비정질 박막의 경우 박막의 미세 구조 및 화학 조성은 결정 박막의 그것과 다르게 박막 전체 영역에서 균일하지 않다. 반사경의 위치에 따른 흡수 차이는 반사경 제작시 또는 제작후 반사경의 흡수를 줄이기 위하여

표 3. 다른 조건에서 제작된 반사경들의 손실과 측정 오차, 측정 공진기의 평균 감쇠시간 측정 결과

시료 번호	L_C (ppm)	L_R (ppm)	L_L (ppm)	측정 공진기의 평균 감쇠시간 (μs)	증착 방식
1	41 \pm 3	33 \pm 3	40 \pm 3	8.166	IBS
2	61 \pm 4	77 \pm 5	64 \pm 6	7.583	IBS
3	208 \pm 4	203 \pm 3	202 \pm 5	5.035	IBS
4	238 \pm 5	236 \pm 1	253 \pm 2	4.564	IBS
5	358 \pm 3	350 \pm 7	362 \pm 4	4.485	IBS
6	448 \pm 4	440 \pm 2	424 \pm 5	3.692	IBS
7	531 \pm 8	563 \pm 18	531 \pm 3	2.840	E/B
8	799 \pm 14	854 \pm 5	828 \pm 2	2.109	E/B
9	1061 \pm 5	1057 \pm 4	1061 \pm 11	1.687	E/B

* L_C, L_R, L_L : 시료의 중앙, 오른쪽, 아래쪽의 손실

수행한 열처리 과정에서 반사경을 구성하는 비정질 물질의 화학적 조성이 반사경 전체 영역에서 균일하게 분하지 않고 부분적으로 다른 화학적 구성으로 변한 결과로 반사경의 흡수가 위치에 따라 다르게 측정되는 것으로 판단된다. 반사경의 위치에 따른 산란 차이는 반사경 기판 세척의 불균일성과 박막 증착시에 발생하는 증기 또는 이온의 불균일한 기판 입사에 따른 박막의 경계면 및 미세구조의 불균일성에 의한 영향으로 판단된다.

표 3과 그림 5는 다른 조건에서 제작된 9개의 반사경의 손실을 측정한 결과이다. 같은 반사경이라 할지라도 위치에 따라 손실이 약간씩 차이가 나므로 반사경의 중심을 포함한 세 점의 손실을 측정하여 평균값을 표시하고 그 오차를 error bar로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제작된 반사경의 손실은 반사경의 손실이 클수록 위치에 따라 손실의 차이가 큰 경향을 나타내었다. 이는 반사경을 구성하고 있는 유전체 물질의 산란 및 흡수가 균일하지 않으며 그 정도가 반사경의 손실이 증가함에 따라 점차 증가함을 의미한다.

그림 6은 서로 다른 손실을 가진 9개의 반사경에 대하여 중앙점의 손실과 측정 오차를 퍼센트로 표현하고 측정 오차의 평균과 장시간 안정도의 최소 오차에 대하여 곡선 맞춤형 결과이다. 측정 결과들은 곡선과 잘 일치함을 볼 수 있고, 그림 6을 토대로 제작된 반사경의 공간적인 손실 분포 차이를 판단

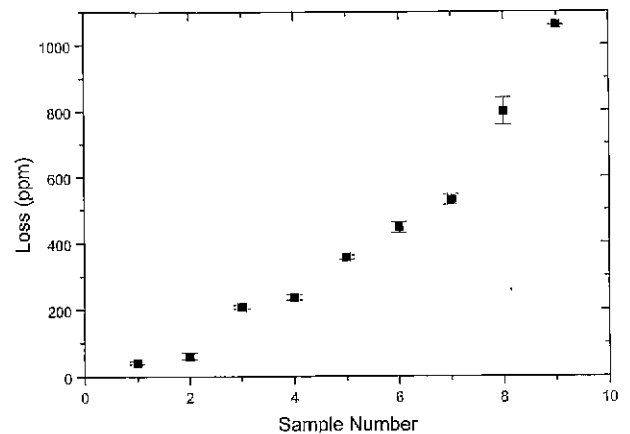


그림 5. 다른 조건에서 제작된 9개 반사경의 손실 측정 결과.

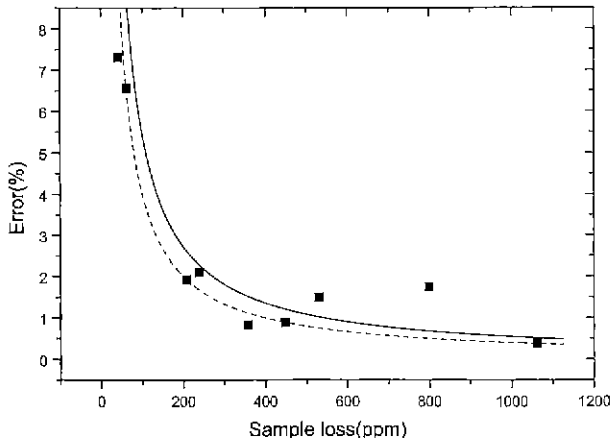


그림 6. 여러 반사경의 손실과 손실 변화의 퍼센트 오차. 실선: 측정 오차의 평균으로 곡선 맞춤, 점선: 장치의 장시간 안정도의 최소 오차로 곡선 맞춤.

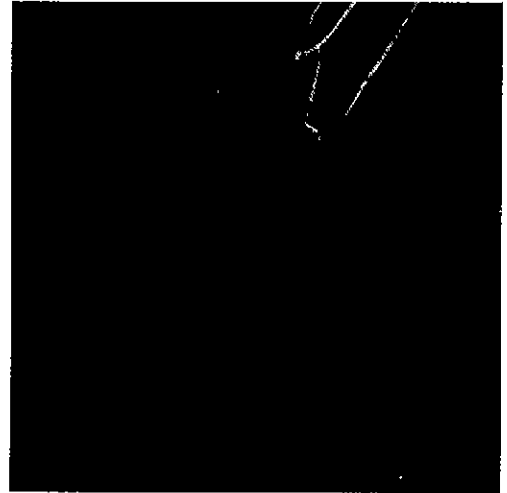


그림 7. 고온의 열처리 결과 인장 응력을 받아 갈라진 전자총 증착 반사경.

할 수 있었다. 즉, 곡선 아래쪽에 위치한 손실 41 ppm인 반사경과 손실 358 ppm인 반사경이 손실 균일성의 관점에서 품질이 우수하다고 평가할 수 있다.

일반적으로 저손실 박막을 제작하기 위해서 사용하는 광학 박막의 물질은 박막 내부의 결정에서 발생하는 산란을 줄이기 위하여 비정질 박막이 제작되도록 조절하며 본 실험에서 제작된 반사경 역시 모두 비정질이었음을 XRD 측정으로부터 확인하였다. 또한 반사경의 흡수를 줄이기 위한 열처리 과정의 경우 TiO_2 를 사용한 반사경의 경우 $250^\circ C$ 이하에서만 열처리를 수행하여 박막의 결정 발생을 억제하였으며 Ta_2O_5 를 고굴절률 물질로 사용한 반사경의 경우는 최고 $450^\circ C$ 까지 열처리하여 열처리 후 모든 반사경이 비정질임을 확인하였다. 한편 TiO_2 를 고굴절률로 사용한 반사경의 결정 생성 온도를 알아보기 위하여 $400^\circ C$ 에서 열처리한 반사경은 그림 7과 같이 모두 인장 응력에 의하여 박막이 깨어져 더 이상의 측정이 불가능하였다.

V. 결 론

파장 632.8 nm, s 편광, 45° 입사각에서 고반사율을 가진 반사경의 손실을 측정하기 위하여 공동 광자 감쇠시간 측정 방법을 이용한 손실 측정 장치를 구성하였다. 이 장치는 두 개의 반사경으로 구성된 기준 공진기를 구성하여 광자 감쇠시간을 측정하고, 다시 45° 측정 반사경이 삽입된 측정 공진기의 광자 감쇠시간을 측정하여 삽입된 반사경의 손실을 결정하는 것이다. 구성된 장치를 사용하여 측정 가능한 반사경의 손실은 약 1200 ppm 미만이었으며 장치의 단시간 안정도와 장시간 안정도를 측정하고 결과 장비의 장시간 안정도의 한계는 3일이며 그 때의 최소 오차는 약 4 ppm이고 감쇠시간 측정 오차는 대부분 반사경의 손실 불균일성에 기인함을 알 수 있었다. 한편 설치된 장치를 사용하여 제작 방법과 손실이 다른 반사경들의 손실을 측정하고 결과 이온빔 스퍼터링 방법을 사용한

반사경이 전자총 증착 방법을 사용한 반사경에 비해 작은 손실을 가진 것을 볼 수 있었으며 반사경의 손실이 공간적 위치에 따라 다른 값을 가짐을 확인하였다. 이는 반사경을 구성하는 물질의 흡수 불균일성과 기판의 세척 및 박막 제작 과정에서 발생하는 산란의 위치에 따른 변화에서 기인한 것으로 판단된다. 또, 반사경 손실과 손실 변화의 퍼센트 오차로부터 각 반사경의 위치에 따른 손실 균일성의 관점에서 품질을 평가할 수 있었다.

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 인하대학교 노재우 교수님과 한국표준연구원 한재원 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. Fritschel, N. Mavalvala, D. Shoemaker, D. Sigg, M. Zucker, and G. Gonzalez, *Appl. Opt.* **37**, 6734 (1998).
- [2] M. Faucheux, D. Fayoux, and J. J. Roland, *J. Optics* **19**, 101 (1988).
- [3] J. W. Hahn, Y. S. Yoo, J. Y. Lee, J. W. Kim, H. W. Lee, *Appl. Opt.* **38**, 1859 (1999).
- [4] J. M. Herblin, J. A. McKay, M. A. Kwok, R. H. Ueunten, D. S. Urevig, D. J. Spencer, and D.J. Benard, *Appl. Opt.* **19**, 144 (1980).
- [5] Z. Li, R. G. T. Bennett and G. E. Stedman, *Opt. Comm.* **86**, 51 (1991).
- [6] G. Remps, R. J. Thompson, H. J. Kimble, and R. Lalezari, *Opt. Lett.* **17**, 363 (1992).
- [7] Dana Z. Anderson, Josef C. Frisch, and Carl S. Masser, *Appl. Opt.* **23**, 1238, (1984).

Measurement of losses in mirror using cavity ring-down method

Myung Jin Shin, Hyun Ju Cho, Kyung Ah Lim, Young Kwon Moon, Gun Moon and Jae-Cheul Lee

Institute for advanced engineering, Opto-electronics team, Yongin 449-020, Korea

(Received January 21, 2000. Revised manuscript received March 29, 2000)

We set up a loss measurement apparatus using cavity ring-down method to get the losses in mirror having a small absorption and scattering. The measured errors could be explained by the loss inhomogeneity of the position of the mirror included in the cavity, and we knew that the long-period measurement limit of apparatus is three days, the minimum error limit of the term is 4 ppm, which were gotten by measuring the long-period and short-period decay time in both reference and test cavity. Also we determined the losses in various mirrors fabricated at our laboratory using the apparatus and we found that the losses in mirrors are quite different at their spatial positions.