

광학부품의 진공자외선특성 측정용 분광반사율계 제작

신동주[†] · 김현종 · 이인원

한국표준과학연구원, 광기술표준부

☎ 305-600, 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2004년 1월 28일 받음, 2004년 7월 22일 수정본 받음)

진공자외선 파장영역에서 광학부품의 분광특성을 측정할 수 있는 중수소광원과 진공단색화장치, 시료챔버 및 광 검출기 구조의 진공자외선 분광반사율계를 제작하였다. 제작된 진공자외선 분광반사율계는 115nm~330 nm의 분광영역에서 약 3.0×10^{-4} Pa의 기압에서 작동하였다. 253.652 nm와 184.95 nm의 수는 선스펙트럼으로 진공단색화장치의 파장을 교정하여 그 분해능이 0.012 nm이고, 파장정확도가 ± 0.03 nm 임을 확인하였다. 중수소 광원을 이용하여 115 nm~230 nm 파장대역의 진공자외선 영역에서 여러 가지 광학부품들에 이용되고 있는 재료(MgF₂, CaF₂, BaF₂, SiO₂, Sapphire)들의 분광투과율과 반사율을 측정하였다.

주제어 : Vacuum ultraviolet radiation, Vacuum monochromator, Vacuum reflectometer, Spectral regular transmittance, Spectral regular reflectance.

I. 서 론

초고속, 초고집적, 초대용량 반도체 소자의 발달은 반도체 소자의 선폭이 수 십 nm 정도에 이르게 되어 157 nm 의 F₂ 레이저를 광원으로 이용하는 차세대 반도체 리소그래피 공정기술개발이 필수적이며 우주선이나 인공위성에 탑재되는 천체망원경이나 카메라 등의 우주산업용 광학장비 역시 점차 진공자외선 영역의 측정을 요구하고 있다. 따라서 리소그래피 연구나 우주산업용 광학장비를 제작하기 위해서는 진공자외선 영역에서의 광학부품들의 광학적 특성에 대한 선행연구가 진행되어야 하며 이를 위해 진공자외선 영역의 광학부품들에 대한 특성을 측정할 수 있는 장비가 필요하다.

분광특성 중에서 분광 정반사율(spectral regular reflectance)과 정투과율(spectral regular transmittance)은 창이나 거울 같은 광학부품의 제작과 특성분석에 필요한 변수이며, 입사각도에 따른 분광 정반사율은 재료의 복소굴절률 측정에도 이용되고 있다.^[1,2] 재료의 분광 정반사율 측정에는 V-W방법 및 고니오방법 등 여러 가지 방법이 사용되지만^[3,4] 진공자외선 영역에서는 측정장치와 시료가 진공시스템 안에 설치되어야 하기 때문에 고니오방법이 자주 사용되고 있다. 또한 진공자외선 영역에서는 대부분의 편광소자의 흡수율이 크기 때문에 편광되지 않은 빛을 이용하여 입사각도에 대한 분광 정반사율 측정방법이 이용되고 있다.^[5]

일반적인 분광반사율계로는 공기중의 산소와 수분에 의한 빛의 흡수때문에 진공자외선 영역에서의 측정이 불가능하였으나, 광원에서 나온 빛이 단색화장치와 시료를 거쳐서 다시 광검출기에 이르는 모든 광경로를 진공상태로 만들어 유지시켜 산소나 수분으로 인한 흡수효과를 제거한 진공자외선

분광반사율계를 이용하여 진공자외선 영역까지 측정대역을 확대하게 되었다.

본 논문에서는 MgF₂창을 가진 중수소광원(deuterium arc lamp), 진공단색화장치(vacuum monochromator) 및 반사율측정부로 구성된 진공자외선 분광반사율계 제작과 이 장치를 이용하여 파장이 115 nm~230 nm인 영역에서 창 재료로 이용되는 MgF₂, CaF₂, BaF₂, SiO₂, Sapphire의 분광 정투과율과 입사각이 10°일 때의 분광 정반사율을 측정된 결과에 대하여 기술하였다. 제작된 측정 장치는 115 nm~330 nm 파장영역에서 10°~70°의 입사각도에 대하여 분광반사율을 측정할 수 있다. 측정시 진공단색화장치 내부의 기압은 약 3.0×10^{-4} Pa, 진공단색화장치의 분해능은 0.012 nm, 파장정확도는 ± 0.03 nm이었다.

II. 측정 장치

2.1. 분광반사율과 투과율

임의의 각도로 입사하여 매질의 표면에서 반사되는 빛의 반사율은 Fresnel 법칙에 의해 입사각(ϕ)과 재료의 굴절률(n)과 소광계수(k)의 함수 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_s = [(a - \cos \phi)^2 + b^2] / [(a + \cos \phi)^2 + b^2]$$

$$R_p = R_s [(a - \sin \phi \tan \phi)^2 + b^2] / [(a + \sin \phi \tan \phi)^2 + b^2]$$

$$R_a = \frac{1}{2} [R_p(1 + p) + R_s(1 - p)] \tag{1}$$

여기에서 a , b 그리고 입사되는 빛의 편광도(degree of polarization), p 는

[†] E-mail: djshin@kriss.re.kr

$$a^2 = \frac{1}{2} \left\{ [(n^2 - k^2 - \sin^2 \phi)^2 + 4n^2 k^2]^{\frac{1}{2}} + (n^2 - k^2 - \sin^2 \phi) \right\}$$

$$b^2 = \frac{1}{2} \left\{ [(n^2 - k^2 - \sin^2 \phi)^2 + 4n^2 k^2]^{\frac{1}{2}} - (n^2 - k^2 - \sin^2 \phi) \right\} \quad (2)$$

$$p = (I_P - I_S) / (I_P + I_S) \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서 ϕ 는 입사각, R_s 는 입사면에 수직한 편광성분(S 파)의 반사율, R_p 는 입사면과 평행한 편광성분(P 파)의 반사율, R_a 는 편광도가 p 인 입사빔에 대한 반사율을 나타낸다.

앞에서 언급한 식들을 사용하여 직접 또는 편광측정방법으로 재료의 굴절율과 소광계수를 구할 수 있다. 진공자외선영역에서는 편광소자의 흡수율이 크기 때문에 반사율측정방법이 주로 사용되고 있으며 보다 정확한 재료의 복소굴절률을 구하기 위해서는 적어도 두 개 이상의 입사각에서 측정된 반사율을 사용해야 한다.

한편, 두께가 d 이고 굴절률이 n 인 매질의 시료에 ϕ 의 입사각으로 빛이 입사할 때 매질의 앞면과 뒷면에서 빛의 투과와 반사를 그림 1에서 보여주고 있다.

일반적으로 광학부품들은 수 mm 정도의 두께이기 때문에 $d \gg \lambda$ 라고 가정하고 매질 내부의 간섭효과를 무시하면 전체 투과율(T), 반사율(R) 및 흡수율(A)는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \frac{1}{I_0} (I_{t0} + I_{t1} + \dots) = \frac{T_f^2 \cdot T_s}{1 - R_f^2 \cdot T_s^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{I_0} (I_{r0} + I_{r1} + \dots) = R_f + \frac{T_f^2 \cdot R_f \cdot T_s^2}{1 - R_f^2 \cdot T_s^2} \quad (5)$$

$$A = 1 - R - T = 1 - R_f - \frac{T_f^2 \cdot T_s}{1 - R_f \cdot T_s} \quad (6)$$

여기서 R_f 는 입사빔의 편광도에 따라 식 (1)과 같이 표시

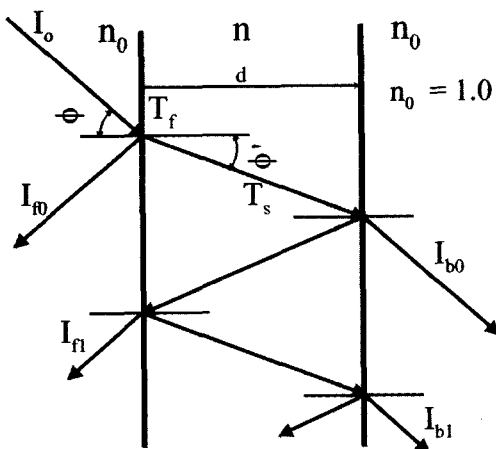


그림 1. 굴절률이 n 인 매질에 임의의 각도로 입사하는 빛의 반사율과 투과율. T_f 는 시료의 표면투과율이며 T_s 는 재료의 내부투과율.

되는 시료의 표면반사율이고, T_f 는 시료의 표면투과율이며 T_s 는 재료의 내부투과율로서 Beer's 법칙에 따라

$$T_s = \exp(-a \cdot \frac{d}{\cos \phi'}) \quad (7)$$

와 같이 표현할 수 있으며, a 는 흡수계수(cm^{-1})로서 $a = \frac{4\pi k}{\lambda} = \frac{4\pi n k}{\lambda_0}$ 를 나타내고 λ_0 는 진공 중에서의 빛 파장이다.

2.2. 분광반사율 측정 장치 구성

진공자외선 영역에서 반사율을 측정하기 위해 제작한 진공자외선 분광반사율계는 크게 광원부와 반사율측정부의 2 부분으로 구별할 수 있다. 광원부는 중수소광원과 진공단색화장치로 구성되어 있으며 반사율측정부는 시료챔버와 광검출기로 구성되어 있다. 즉, 진공자외선 분광반사율계는 중수소광원에서 나온 빛이 진공단색화장치를 거쳐 분광되고, 시료챔버 내부의 시료에서 반사되어 광검출기에 이르게 구조로 되어있으며 그 외에 진공자외선 영역을 측정하기 위해 광원에서 광검출기까지 모든 부분들을 진공상태로 만들어 주기 위한 진공시스템이 있다. 이들의 장치도와 사진을 그림 2와 그림 3에서 각각 보여주고 있다.

광원은 MgF_2 창을 가진 300 mA, 70 V 규격의 중수소 광

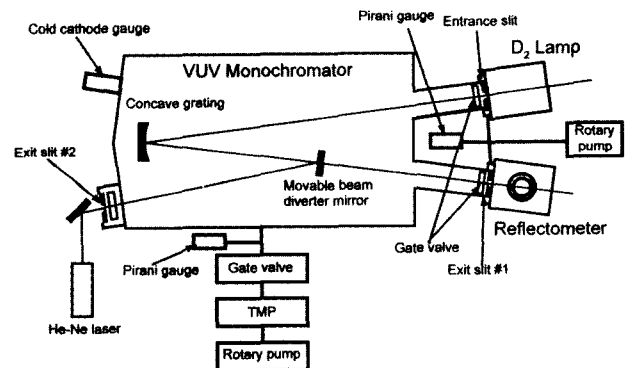


그림 2. 진공자외선 분광반사율계 및 진공시스템.



그림 3. 제작된 진공자외선 분광반사율계.

원을 사용하였다. 진공단색화장치(ARC Model VM-521 SG)는 입사하는 빔의 광축과 회절되는 빔의 광축이 15° 각도를 가지고 있으며, 오목회절격자는 초점거리가 1 m이고 홈 수가 1200 grooves/mm이며 분광파장대역은 30~330 nm에 이른다. 진공단색화장치에는 입사슬릿 한 개와 출사슬릿 두 개가 있으며 진공상태에서도 외부에서 회전시킬 수 있는 빔전환 거울을 이용하여 두개의 출사슬릿 중에서 하나를 선택할 수 있다. 본 연구에서는 출사슬릿 하나는(Exit slit #2) 헬륨 네온 레이저를 이용하여 진공단색화장치와 광원의 광축을 정렬할 때 사용하였다.

그림 4는 진공자외선 반사율측정부의 구조를 나타낸다. 시료는 광축과 수직인 방향으로부터 0°~90° 회전할 수 있고, 시료의 각도가 90°가 되면 시료는 광축으로부터 벗어나도록 되어있기 때문에 진공단색화장치의 출사슬릿에서 나온 빛이 직접 광 검출기에 입사되어 입사빔의 세기를 측정할 수 있다. 분광반사율 측정이 가능한 입사각도는 10°~70°이다.

광 검출기는 석영으로 된 광 파이프의 한쪽 끝에 연결되어 있는 광증배관(photomultiplier tube; EMI 9635QB)이며, 빛이 조사되는 광 파이프의 다른 끝에는 형광물질이 코팅되어 있고 중간부분은 시료와 부딪치지 않고 시료의 표면을 중심으로 0°~180° 회전할 수 있도록 구부러져 있다. 시료와 광 검출기는 진공을 유지하면서 외부에서 회전시킬 수 있다.

한편, 진공자외선 영역에서는 공기 중의 산소에 의해 발생하는 빛의 흡수영향을 제거 하기위해 유희전 진공펌프(rotary pump)와 터보분자펌프(turbo molecular pump)를 순차적으로 사용하는 진공시스템을 이용하여 광원, 진공단색화장치, 시료와 광 검출기가 포함된 반사율계 등의 모든 부분들을 고진공으로 만들고 유지하도록 해야 한다.

진공단색화장치와 터보분자펌프사이에는 압축공기를 이용하여 전기로 동작하는 게이트밸브(Gate Valve 1)를 설치하여 측정하지 않는 동안에는 밸브를 닫아서 진공단색화장치의 내부는 진공으로 유지될 수 있게 하였다. 정전과 같이 비정상적으로 전원이 차단될 때에도 진공단색화장치를 보호하기

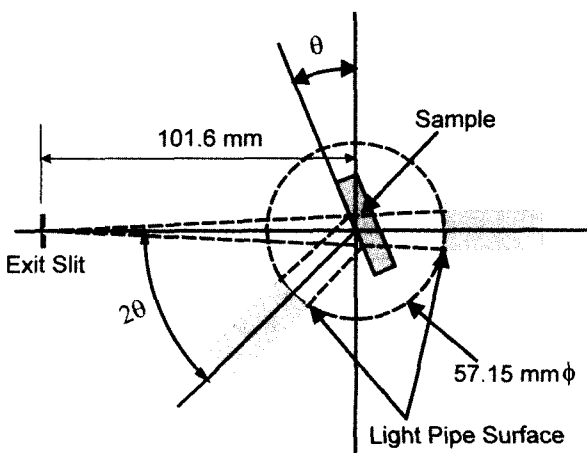


그림 4. 진공자외선 분광반사율계의 시료챔버의 구조.

위해서 자동으로 게이트 밸브가 닫히도록 제작되었다.

유희전 진공펌프와 터보분자펌프로 조합된 배기시스템을 이용하여 배기했을 때 진공단색화장치 내부의 최저기압은 약 1.0×10^{-4} Pa 이었고, 피라니게이지(Pirani gauge 1) 한 개와 냉음극게이지 한 개를 이용하여 측정하였다.

진공단색화장치와 광원, 진공단색화 장치와 반사율측정부 사이에는 각각 슬릿과 게이트밸브가 포함되어있는 슬릿챔버가 설치하였으며, 각각의 슬릿챔버는 별도의 유희전 진공펌프(Rotary pump 2)와 피라니게이지(Pirani gauge 2)를 연결하여 광원, 광 검출기 또는 반사율계 내부에 설치되는 시료를 교체할 경우에도 진공단색화장치의 진공을 유지하면서 교체할 수 있게 하였다. 즉, 반사율계에서 시료를 교체할 경우에는 슬릿챔버에 있는 게이트밸브(gate valve 2)를 닫고 반사율계에 공기를 주입하여 시료를 교체한 후에 유희전 진공펌프(Rotary pump 2)로 반사율계의 내부 기압을 약 100 Pa이하로 낮은 수준의 진공으로 만든 다음 유희전 진공펌프와 연결된 밸브를 닫고 슬릿챔버의 게이트밸브를 열어서 진공단색화장치에 연결된 터보분자펌프를 이용하여 배기될 수 있게 하였다.

2.3. 진공단색화장치의 파장 교정

광학부품의 진공자외선 특성측정에 사용된 진공단색화장치의 입사슬릿에 저기압 수은광원을 설치하고 출사슬릿에 광 검출기를 설치하여 진공단색화장치의 초점과 파장을 교정하였다. 진공단색화장치의 최대분해능을 얻기 위해서 수은광원을 이용하여 253.652 nm 선스펙트럼의 선폭이 최소가 되도록 오목회절격자의 초점위치를 조정하였다. 광 검출기로는 형광물질이 코팅된 창을 가진 광증배관을 사용하였다. 입사슬릿과 출사슬릿의 폭을 10 μm로 조정했을 때 선폭이 최소가 되는 위치에서 수은등의 선스펙트럼 분포를 아래의 그림 5에서 보여주고 있으며 이때 253.652 nm 선스펙트럼 반

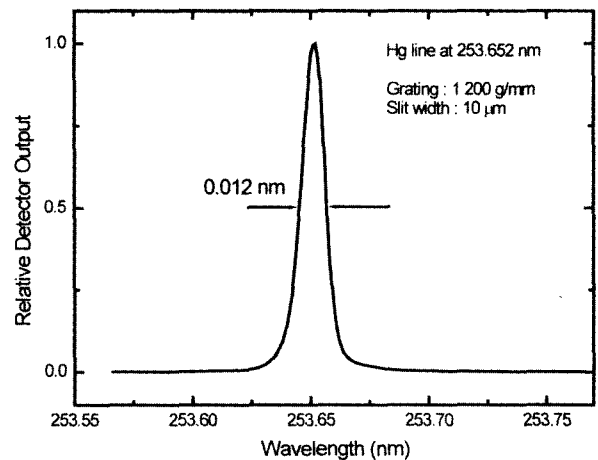


그림 5. 진공단색화장치의 최대분해능 측정. 저기압 수은광원의 253.652 nm 선스펙트럼을 이용하여 결정한 진공단색화장치의 최대분해능은 0.012 nm이다.

폭 치는 0.012 nm로 측정되었다.

진공단색화장치의 파장교정은 수은의 선스펙트럼인 253.652 nm을 이용하였다. 즉, 측정되는 수은의 253.652 nm 선스펙트럼이 진공단색화장치의 253.652 nm 위치와 일치하도록 진공단색화장치의 파장위치를 교정하였다. 이렇게 교정된 진공단색화장치로 측정된 253.652 nm와 184.950 nm 수은 선스펙트럼을 그림 6에 그렸다. 184.950 nm 인 수은 선스펙트럼의 위치는 진공단색화장치에서 184.93 nm로서 0.02 nm의 차이를 가지고 있다.

그림 7은 수은의 선스펙트럼을 이용하여 파장을 교정했을 때 중수소광원의 영차(zero order)스펙트럼의 파장위치를 나타내며 약 0.07 nm의 차이가 있다. 따라서 실제 측정에 이용되는 파장영역은 110 nm~230 nm이므로 이 영역에서 파장의 정확도는 약 ± 0.03 nm라고 할 수 있다.

광학부품의 진공자외선 분광투과율과 반사율은 MgF₂창을

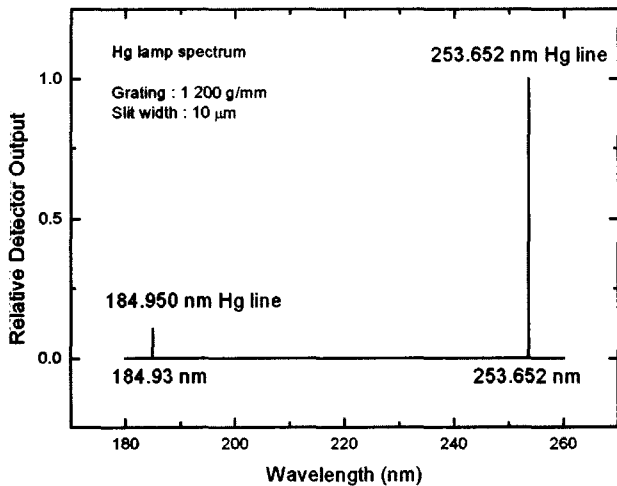


그림 6. 진공단색화장치를 253.652 nm 수은 선스펙트럼으로 교정하여 측정된 수은의 선스펙트럼. 184.93 nm 위치에서 184.95 nm 수은의 선스펙트럼이 나타났다.

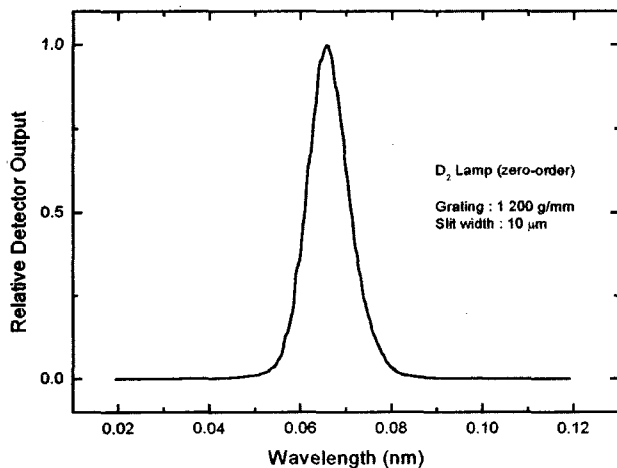


그림 7. 교정된 진공단색화장치로 측정된 중수소광원의 영차(zero order) 스펙트럼.

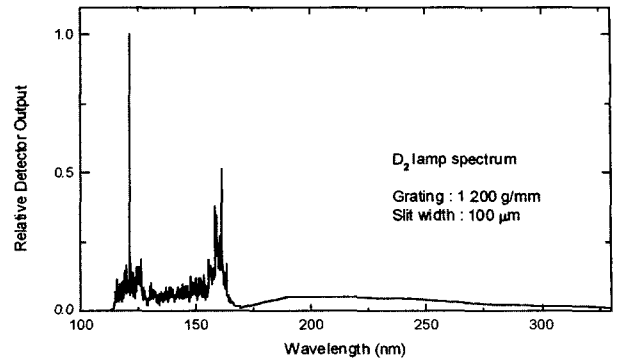


그림 8. 진공단색화장치로 측정된 중수소광원의 분광분포.

가진 중수소광원과 입사각도에 대한 분광반사율을 측정할 수 있는 진공자외선 분광반사율계를 이용하여 측정하였다. 그림 8은 분광반사율과 분광투과율 측정에서 광원으로 사용된 중수소광원의 분광분포를 나타낸다.

III. 광학부품의 진공자외선 분광반사율 측정

시료의 분광투과율, $T(\lambda)$ 는 시료의 각도를 90°로 하여 슬릿에서 나온 빛이 시료를 거치지 않고 직접 광검출기에 입사되도록 하여 전체 입사 빔의 세기, $I_0(\lambda)$ 를 측정 후 시료의 각도를 0°로 회전하여 빛의 세기, $I_T(\lambda)$ 를 측정하여 이들의 비율, $T(\lambda) = I_0(\lambda)/I_T(\lambda)$ 로서 측정하였다. 분광반사율, $R(\lambda)$ 은 위에서와 같이 $I_0(\lambda)$ 를 측정하고, 시료의 각도를 측정하고자 하는 입사각도 θ , 광검출기의 각도를 2θ 로 조정하여 반사된 빛의 세기, $I_\theta(\lambda)$ 를 측정하여 분광반사율, $R_\theta(\lambda) = I_\theta(\lambda)/I_0(\lambda)$ 를 측정하였다.

제작된 광학부품의 진공자외선 특성 측정 장치를 이용하여 창 재료로 사용되고 있는 MgF₂, CaF₂, BaF₂, SiO₂, Sapphire 분광투과율과 입사각이 10°일 때 115 nm~230 nm 파장영역에서 분광반사율을 측정하였다. 시료의 크기는 직경이 25.4 mm, 두께가 6.35 mm이다. 측정 시 진공단색화장치 내부의 기압은 약 3.0×10^{-4} Pa, 슬릿 폭은 100 μm이었다.

여러 가지 창 재료의 진공자외선 분광투과율을 그림 9에서 보여주고 있다. 진공자외선 영역에서 측정된 분광투과율을 살펴보면 MgF₂의 경우 대부분의 진공자외선영역에서 약 70% 이상의 투과율을 가지고 있으며 특히, 160 nm 이상의 파장영역에서는 약 90% 이상의 높은 투과율을 가진다. 117 nm 파장근방에서 투과율이 매우 급격하게 감소하여 0에 접근해 있다. 사파이어는 투과율이 200 nm 이상의 파장영역에서는 40%를 넘지 못하고 있으며 180~200 nm 영역에서 감소하여 180 nm 이하의 영역에서는 거의 0에 접근해 있다. 한편, 일반적인 광학재료로 많이 쓰이고 있는 SiO₂의 경우는 160~170 nm의 파장영역에서 투과율이 급격하게 감소하여 160 nm 이하의 영역에서는 거의 0에 접근해 있고, 170 nm 이상의 영역에서는 90%에 가까운 매우 높은 투과율을 가진다.

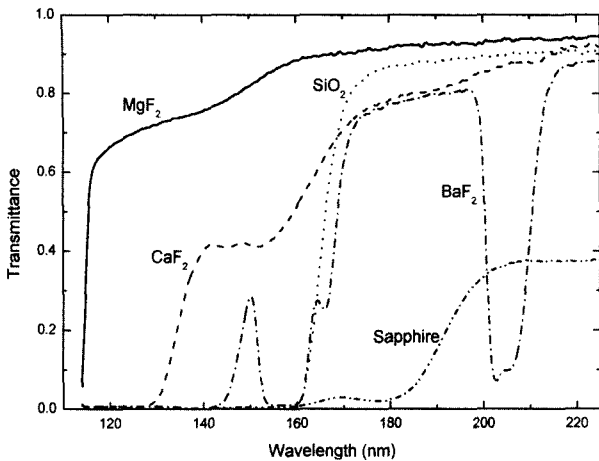


그림 9. 진공자외선영역에서 측정된 여러 가지 재료의 분광투과율.

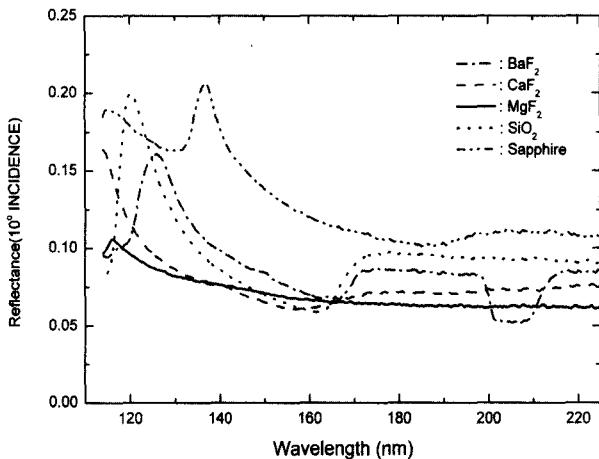


그림 10. 진공자외선영역에서 측정된 여러 가지 재료의 분광반사율.

그림 10은 입사각이 10일 때 창 재료의 표면에서의 분광 정반사율을 나타낸다. 측정된 재료들의 반사율은 22% 이하이며 대부분의 영역에서 약 10% 내외의 반사율을 가지고 있다.

한편, 그림 9의 진공자외선 분광투과율과 그림 10의 진공 자외선 분광반사율을 살펴보면 SiO₂, BaF₂와 CaF₂ 등의 반사율은 170 nm 근방에서 그리고 사파이어의 반사율은 190 nm 근방에서 조금 증가하는 것을 보여주고 있다. 각 시료의 투과영역에서 나타나는 반사율의 증가는 시료의 뒷면에서도 빛이 반사되고 있음을 보여주고 있다.

그림 11은 SiO₂의 굴절율과 소광계수^[6]를 이용하여 식 (1)~식 (5)로 계산한 SiO₂의 전면반사율(surface reflectance) 및 후면반사를 고려한 전체반사율(total reflectance)과 진공자외선 분광반사율계로 측정된 SiO₂의 반사율(measured reflectance)을 나타낸다. 이 때 SiO₂ 시료의 두께는 6.35 mm, 빛의 입사 각도는 10로 하여 계산 및 측정하였다.

IV. 결 론

중수소광원과 초점거리가 1 m인 진공단색화장치로 구성된

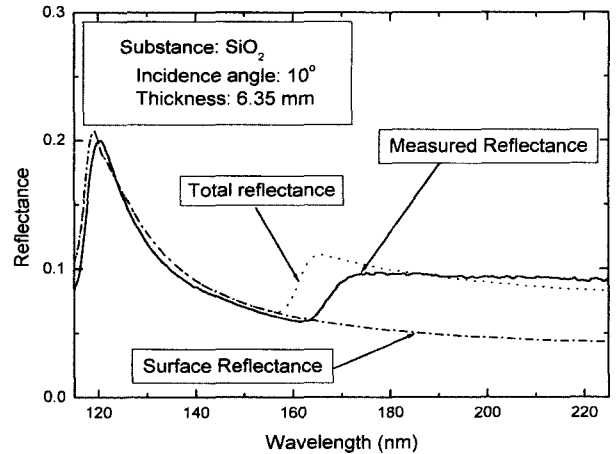


그림 11. 입사각이 10°일 때 굴절률과 소광계수로 계산한 SiO₂의 전면반사율(surface reflectance) 및 후면반사를 고려한 전체반사율(total reflectance)과 진공자외선 분광반사율계로 측정된 SiO₂의 반사율(measured reflectance).

광원모듈과 시료챔버 및 광검출기로 구성된 반사율 측정부 그리고 진공시스템을 이용하여 115~330 nm의 진공자외선 파장영역에서 광학부품의 분광특성을 측정할 수 있는 진공 자외선 분광반사율계를 제작하였다. 제작된 진공자외선 분광 반사율계는 약 3.0×10^{-4} Pa의 기압상태에서 작동하였으며 253.652 nm와 184.95 nm의 수은 선스펙트럼을 이용하여 진공단색화장치의 파장을 교정하였다. 측정이 가능한 진공자외선 영역에서 진공단색화장치의 분해능은 0.012 nm, 파장정확도는 ± 0.03 nm이었다. 제작된 장비를 이용하여 창 재료로 사용되는 MgF₂, CaF₂, BaF₂, SiO₂, Sapphire의 115 nm~230 nm 파장영역에서 분광투과율과 입사각이 10° 일 때 분광반사율을 측정하였다.

참고문헌

- [1] D. W. Juenker, "Digital Evaluation of the Complex Index of Refraction from Reflectance Data," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 55, pp. 295-299, 1965.
- [2] W. R. Hunter, "Errors in using the Reflectance vs Angle of Incidence Method for Measuring Optical Constants," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 55, pp. 1197-1204, 1965.
- [3] "Absolute methods for reflection measurement," CIE Tech. Rep. 44(CIE, Vienna, 1979).
- [4] J. M. Palmer, "The measurement of transmission, absorption, emission, and reflection," in *Handbook of Optics* (American Institute of Physics, New York, 1977), Vol. II, Chapter 25.
- [5] W. R. Hunter, "Measurement of optical properties of materials in the vacuum ultraviolet spectral region," *Appl. Opt.* vol. 21, pp. 2103-2114, 1982.
- [6] H. R. Philipp, "Silicon Dioxide (SiO₂) (Glass)," in *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic Press, San Diego, 1998), pp. 749.

Fabrication of reflectometer for vacuum ultraviolet spectral characteristic measurements of optical components

Dong-Joo Shin[†], Hyun-Jong Kim, and In-Won Lee

Division of Optical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, 305-600, Korea

[†]*E-mail: djshin@kriss.re.kr*

(Received January 28, 2004, Revised manuscript July 22, 2004)

We fabricated a vacuum ultraviolet spectro-reflectometer which consists of a deuterium light source, a vacuum monochromator, and a sample chamber and detector module. The operation was performed in the ultraviolet spectral ranges between 115 nm and 330 nm at the vacuum pressure of 3.0×10^{-4} Pa. The wavelength of the vacuum monochromator was calibrated with the line spectrum of a low pressure Mercury lamp of 253.652 nm and 184.95 nm wavelengths, and its resolution was 0.012 nm, and the precision of wavelength was ± 0.03 nm. With this reflectometer and a deuterium lamp, we measured the spectral regular transmittance and reflectance of materials(MgF₂, CaF₂, BaF₂, SiO₂, Sapphire) used as optical components over the spectral range between 115 nm and 230 nm.

OCIS Codes : 120.5700, 120.4140, 260.7210, 300.6540.