

분광 타원해석기 입사각의 정밀 보정

김현종 · 김상열

아주대학교 물리학과

이윤우 · 조현모 · 조용재 · 이인원

한국표준과학연구원 영상그룹

(1999년 3월 17일 받음, 1999년 5월 7일 수정본 받음)

반도체 및 박막의 두께 측정에 많이 이용되는 분광 타원해석기의 입사각을 정밀하게 보정하기 위한 방법을 제안하고 이를 실험적으로 확인하였다. 몇 종류의 광학유리를 이용하여 프리즘과 기판을 가공하였다. 프리즘의 꼭지각과 최소 벗어나기각을 측정해 광학유리의 굴절률을 결정하였고 브루스터각(Brewster's angle)에서 측정한 유리기판의 타원해석 스펙트럼을 분석하기 위한 기준값으로 이 굴절률을 사용하여 분광 타원해석기의 입사각을 0.01도의 정밀도로 결정, 보정하였다.

I. 서 론

반도체 게이트 박막의 두께가 100 Å 이하로 얇아지면서 박막두께의 정확한 측정이 요구되고 있으며 분광 타원해석기는 이러한 요구를 수용할 수 있는 대표적인 측정장비로 주목받고 있다. 박막두께의 정밀측정을 위해서는 분광 타원해석상수의 정밀측정이 선행되어야 한다. 산업체에서 이용하고 있는 분광 타원해석기는 대부분이 상업적인 모형으로 이미 많은 부분의 오차를 제거하여 그 측정정확도가 향상되어 있다. 그러나 입사각에 대한 오차는 단순하게 고니오미터(goniometer)와 엔코더를 이용한 하드웨어적인 입사각 보정[1-3]과 광학적 특성을 이미 잘 알고 있는 단결정 규소 같은 시료를 이용해 측정, 분석해 입사각을 보정하는 소프트웨어적인 방법[4]을 이용하고 있다. 본 연구에서는 가변입사각 분광 타원해석기를 사용할 때 나타나는 입사각의 오차를 보정하는 새로운 방법을 제시하고 이를 실제 이용하고 있는 분광 타원해석기에 적용하여 그 입사각의 오차를 측정, 분석하고 보정하였다. 먼저 프리즘의 꼭지각(apex angle) 및 최소 벗어나기각(angle of minimum deviation)을 측정하여 광학유리 물질의 굴절률을 정확하게 결정하고, 이 굴절률을 브루스터각에서 측정한 타원해석 스펙트럼 분석의 기준값으로 사용하여 입사각을 결정하였다.

II. 이 론

2.1. 프리즘의 최소 벗어나기각을 이용한 광학유리의 굴절률 결정

프리즘 형태의 광학유리는 그 꼭지각과 최소 벗어나기각을 측정함으로써 굴절률을 정확하게 결정할 수 있다. 그림 1은 프리즘의 꼭지각과 최소 벗어나기각에 대한 간략한 개략도이다. 입사하는 빛에 대해 프리즘을 통과한 빛의 벗어나기가 최소가 되는 분산각도가 바로 최소 벗어나기각(δ_m : angle of minimum deviation)이다. 벗어나기각 δ 은 입사각 θ , 꼭지각

α , 그리고 매질의 굴절률 n_0 와 광학유리 프리즘의 굴절률 n 으로 아래 식과 같이 표현된다.

$$\delta = \theta + \sin^{-1} \left[\sin \alpha \left(\frac{n^2}{n_0^2} - \sin^2 \theta \right)^{1/2} - \sin \theta \cos \alpha \right] - \alpha \quad (1)$$

최소 벗어나기각은 굴절률 n 과 마찬가지로 파장의 함수이다. 가시영역에서 대부분의 유전체의 경우, 파장이 증가함에 따라 굴절률이 감소하며 따라서 최소 벗어나기각도 파장이 증가함에 따라 마찬가지로 감소한다. 즉, 빨간빛이 파란빛보다 작은 최소 벗어나기각을 가진다. 그림 2는 꼭지각이 60도인 전형적인 광학유리 프리즘에 대해 입사각의 변화에 따른 벗어나기각의 변화를 보여주고 있다.

최소 벗어나기 조건을 만족할 때 이등변 삼각형인 프리즘의 내부를 지나는 빛은 프리즘의 밑변과 나란하게 진행한다. 이 조건을 이용하면 최소 벗어나기각과 꼭지각을 사용하여 프리즘의 굴절률을 아래 (2)식과 같이 쓸 수 있다. 여기에서 n_0 는 공기의 굴절률이다.

$$n = n_0 \frac{\sin[(\alpha + \delta_m)/2]}{\sin(\alpha/2)} \quad (2)$$

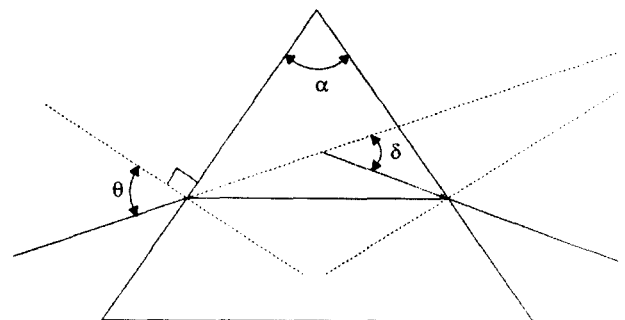


그림 1. 입사각(θ), 꼭지각(α) 및 벗어나기각(δ)을 보여주는 프리즘의 기하학적인 개략도.

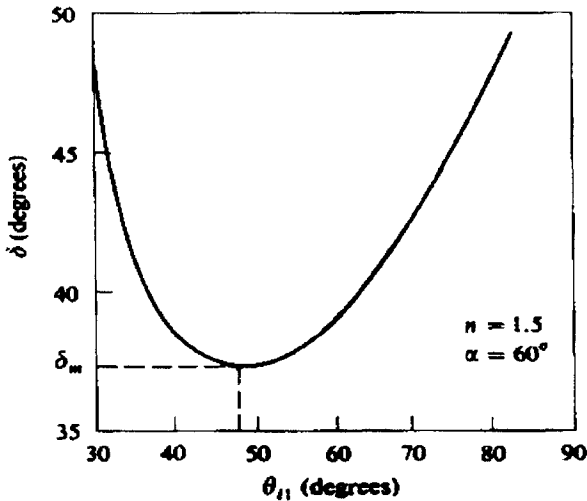


그림 2. 꼭지각 60도이고 굴절률이 1.5인 전형적인 광학유리 프리즘의 입사각의 변화에 따른 벗어나기각의 변화(최소 벗어나기각 δ_m 은 37.18도 이다.).

2.2. 브루스터각에서의 타원해석 스펙트럼

프리즘의 최소 벗어나기각 측정으로 구해진 광학유리물질의 굴절률은 타원해석 스펙트럼의 분석에 기준데이터로 사용하였다. 타원해석기 입사각을 정밀하게 보정하기 위해서 브루스터각을 이용하여 타원해석 스펙트럼을 측정하였다. 브루스터각에서는 입사면에 평행한 p파의 반사계수는 0이다. 광학유리의 굴절률은 파장에 따른 분산을 보이고 있으므로 브루스터각도 파장에 따라 달라지며 입사각이 어느 파장의 브루스터각과 같을 경우 타원해석 스펙트럼은 다음과 같은 특징적인 변화를 보인다. 즉, 표면층이 없는 시료의 타원해석상수 Δ 는 입사각이 브루스터각도가 되는 파장을 중심으로 하여 0도에서 180도로 급격하게 변화한다. 반면에 Ψ 는 브루스터각에서 최소값인 0도의 값을 가지게 된다.¹⁵⁾ 그러나 대부분의 시료들은 수 nm 이상의 표면미시거칠기 즉 유효 표면층을 가지고 있어서 브루스터각 주위에서 Δ 의 변화율이 덜 급격하게 된다. Δ 의 증가는 표면층의 두께와 연계되어 비교적 넓은 에너지영역에 걸쳐 일어나게 된다. 표면층의 효과는 Ψ 의 경우 브루스터각에서 0도가 아닌 최소 값을 가지게 된다. 입사각이 바뀌게 되면 다른 파장에서 브루스터각에 대한 조건이 만족하며 Δ 가 급격하게 증가하는 중심파장 위치와 Ψ 가 최소 값을 가지는 파장 위치가 동시에 이동을 한다. 광학유리를 사용하면 이 파장이 동율은 대략 5 eV/도 정도이다. 따라서, 타원해석기의 파장분해능을 0.005 eV라고 하면 이에 대응되는 입사각 측정 분해

표 1. BK-7, LaC-14, NbFD-13 등의 광학유리 프리즘의 꼭지각과 몇가지 파장에서의 최소 벗어나기각 측정치들

| | BK-7(도) | LaC-14(도) | NbFD-13(도) | |
|-------------------------|----------|-----------|------------|---------|
| 꼭지각 (α) | 54.4025 | 54.4020 | 54.4021 | |
| 최소 벗어나기각 (δ_m) | 643.8 nm | 33.2857 | 47.0783 | 56.4623 |
| | 546.1 nm | 33.5750 | 47.5968 | 57.3525 |
| | 480.0 nm | 33.8769 | 48.1362 | 58.3358 |

능은 0.001도가 된다. 이로부터 Δ 가 급격하게 변화하는 영역과 Ψ 가 최소 값을 가지는 영역을 확인하여 입사각을 정확하게 결정할 수 있음을 알 수 있다.

III. 실험 및 결과

3.1. 시료 및 측정장비

정밀한 측정을 위해서 다음과 같이 두 가지 형태로 광학유리 시료들을 준비했다. 한 덩어리의 광학유리 물질을 두 조각으로 나누어 한 조각으로는 꼭지각이 약 54.4도이며 빛면의 길이가 약 20 mm인 프리즘을 가공하였고, 다른 한 조각은 5~6 mm 정도의 두께를 가지는 유리기판으로 가공하였다. 프리즘의 두 빛면과 유리기판의 한 면은 평탄한 면이 되도록 연마를 하였고 나머지 면은 반사가 일어나지 않도록 거칠게 가공하였다. 프리즘 및 기판의 제작에 이용된 광학유리물질은 HOYA사의 BK-7, LaC-14, NbFD-13 등이다. 이에 더하여 그 굴절률이 잘 알려져 있는 비정질 실리카(fused silica, SiO₂)와 단결정규소(c-Si)도 타원해석 스펙트럼 측정에 사용하였다. Moller-Wedel사의 고니오미터(goniometer)를 사용하여 프리즘의 꼭지각과 최소 벗어나기각을 측정하였고, Jobin-Yvon사의 분광타원해석기(UVISEL)를 사용하여 기판의 타원해석 스펙트럼을 측정하였다.

2.2. 측정 및 결과

2.2.1. 프리즘을 이용한 광학 유리물질의 굴절률

BK-7의 경우 측정된 프리즘의 꼭지각은 약 54.402도 이고, 최소 벗어나기각은 643.8 nm, 546.1 nm, 480.0 nm에서 각각 33.2857, 33.5750, 33.8769 도이다. BK-7을 포함하여 LaC-14, NbFD-13의 꼭지각 및 최소 벗어나기각들은 표 1에 정리되어 있는 바와 같다. 프리즘의 꼭지각과 최소 벗어나기각을 식 (2)에 대입하여 계산한 각 광학유리들의 파장에 따른 굴절률들은 표 2에 정리하였다. 각의 측정에 사용된 고니오미터의 정밀도는 0.0001도이지만 측정에 따르는 실질적인 오차는 0.001도로 추정된다. 꼭지각 α 와 최소벗어나기각 δ_m 의 오차가 0.001도 일 때 식(2)로부터 계산되는 굴절률의 최대 오차는 BK-7의 경우 0.000026이며 NbFD-13의 경우 0.000031이다.

측정된 파장이외의 파장에서의 굴절률은 다음과 같이 구하였다. 즉 표 2에서의 굴절률들을 식(3)과 같은 Sellmeier 식에 최적맞춤을 하여 분산 계수들을 결정함으로써 넓은 파장대역에서 굴절률을 사용할 수 있도록 하였다. 최적맞춤한 Sellmeier 계수들을 표 3에 정리해 놓았다. 계산된 굴절률 분

표 2. 표 1에 주어진 프리즘의 꼭지각과 최소 벗어나기각으로 계산한 각 광학유리들의 몇 가지 파장에서의 굴절률

| | BK-7 | LaC-14 | NbFD-13 |
|----------|---------|---------|---------|
| 643.8 nm | 1.51536 | 1.69386 | 1.80142 |
| 546.1 nm | 1.51934 | 1.70010 | 1.81101 |
| 480.0 nm | 1.52348 | 1.70656 | 1.82147 |

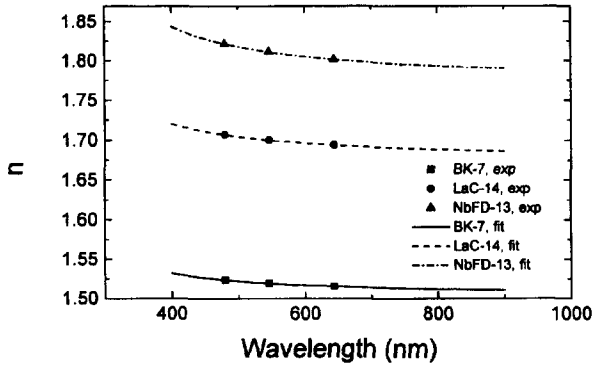


그림 3. 광학 유리물질들의 프리즘으로부터 측정된 굴절률(심별)과 Sellmeier 분산식에 최적맞춤하여 결정한 굴절률(선)

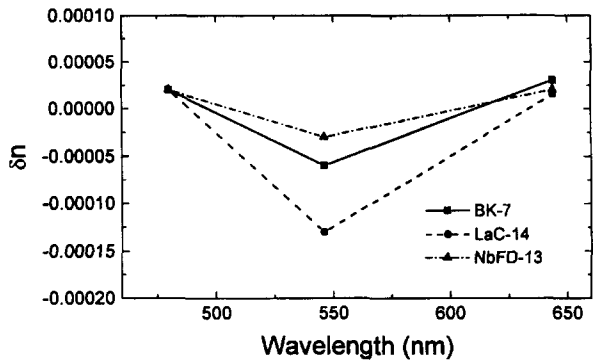


그림 4. 광학 유리물질들의 측정된 굴절률과 Sellmeier 분산식에 의한 그림 3의 굴절률의 차이($n_{fit} - n_{measure}$).

산 그래프를 측정된 굴절률들과 같이 그림 3에서 보여주고 있으며 480.0 nm, 546.1 nm, 643.8 nm의 파장에서 측정된 굴절률과 구해진 분산식에 의한 굴절률의 차이를 그림 4에 보여주고 있다. 이 굴절률의 차이는 최대 0.00015 이하로써 이 정도의 굴절률 차이에 의한 타원해석기의 입사각 측정오차는 0.01도 이하이므로 분산식에 의한 광학유리의 굴절률을 타원해석 스펙트럼의 분석에 기준값으로 이용하였다. 한편 꼭지각 측정 및 최소벗어나기각 측정에 있어서의 오차가 프리즘 물질의 굴절률 결정에 미치는 오차는 0.000026~0.000031 이하로 분산식에 최적맞춤하는 과정에서의 오차의 20% 이내이고 따라서 이로 인한 입사각 결정에서의 오차도 0.002도 이하가 되어 상대적으로 꼭지각과 최소벗어나기각 측정에서의 오차는 무시할 수 있을 정도로 작다.

$$n^2 = a + \frac{b\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (3)$$

2.2.2. 브루스터각에서 측정된 타원해석 스펙트럼

프리즘을 가공한 BK-7, LaC-14, NbFD-13과 굴절률이 잘 알려진 비정질 실리카와 단결정규소등의 타원해석 스펙트럼들을 각각의 물질들의 브루스터각 근방에서 0.76~4.0 eV영역에서 0.02 eV간격으로 0.1도, 0.2도, 또는 0.3도의 입사각 간격으로 측정하였다. 측정된 스펙트럼들을 브루스터각 근방에서 전산시능하여 계산한 스펙트럼과 비교하여 입사각의 오차를 결정하였다. 브루스터각에서는 p파의 반사율이 0이므로 중심

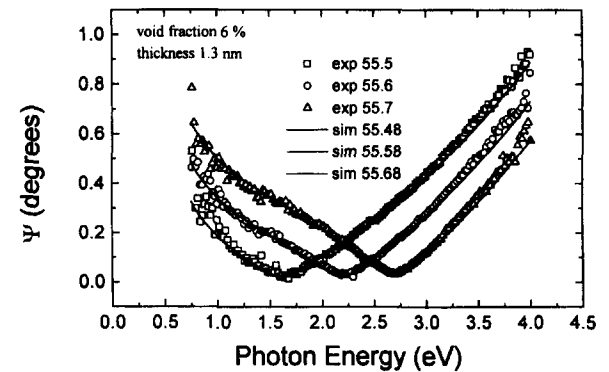
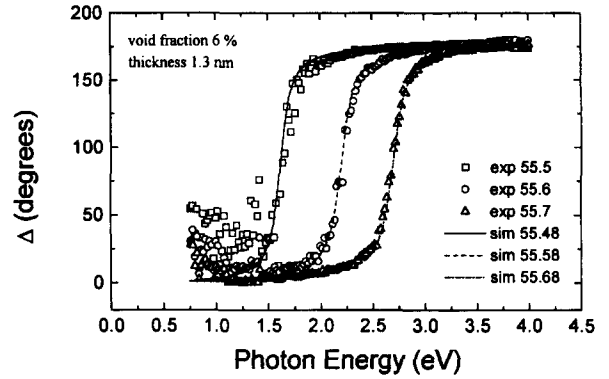


그림 5. 비정질 실리카의 브루스터각(55.5-55.7도)에서 측정(심별) 및 최적맞춤(선)한 타원해석 스펙트럼들(Δ, Ψ). 유효표면층의 두께는 13 Å, void fraction은 6%, 입사각 차이 ($\phi_m - \phi_0$)는 대략 -0.02도이다.

측정 파장주위에서는 빛의 세기가 매우 약하다. 이를 보상이기 위해 매 측정파장별로 노출시간을 40배 정도 길게하여 측정하였다.

비정질 실리카의 브루스터각 근방에서 측정된 타원해석 스펙트럼들(심별)과 최적맞춤한 타원해석 스펙트럼(선)들을 그림 5에 비교해 놓았다. 55.5, 55.6, 55.7도의 입사각에서 각각 측정된 타원해석 스펙트럼들에 최적맞춤되는 타원해석 스펙트럼들은 각각 입사각이 55.48, 55.58, 55.68도이며, void fraction이 6%이고 두께가 13 Å인 유효표면층이 존재하고 있음을 가리킨다. 이로부터 실제의 입사각은 측정입사각보다 0.02도 작음을 알 수 있다. 또한 유효표면층이 얇아 Δ 는 중심파장 주위에서 0도에서 180도로 급격하게 변화하고, Ψ 는 거의 0도에 접근한 최소 값을 가진다.

단결정 규소기판에 대해서도 비정질 실리카에 대해서와 마찬가지로 측정 및 분석을 하였다. 측정된 타원해석 스펙트럼들과 최적맞춤한 타원해석 스펙트럼들을 그림 6에서 비교하였다. 75.6, 75.9, 76.2, 76.5도의 입사각으로 측정된 타원해석 스펙트럼들을 최적맞춤하여 실제 입사각이 0.03도 작은 75.57, 75.87, 76.17, 76.47도임을 확인할 수 있다. 유효표면층은 이산화규소(SiO₂)로 두께가 28 Å이고 조밀도가 93%이며 그 두께가 비정질 실리카의 유효표면층보다 두꺼워서 타원해석상수 Δ 는 변화율이 작아져 브루스터각의 중심파장 주위에서 비교적 넓은 파장영역에 걸쳐 변화를 하고, Ψ 는 최소 값이 0에서 비교적 멀어진다.

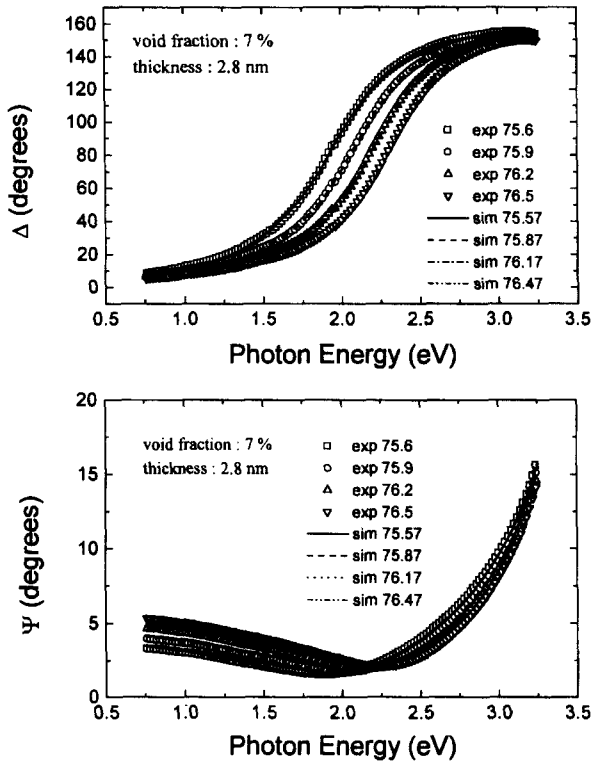


그림 6. 단결정 규소의 브루스터각(75.6-76.5도)에서 측정(심벌) 및 최적맞춤(선)한 타원해석 스펙트럼들(Δ , Ψ). 유효표면층은 이산화 규소(SiO_2)이며 두께는 28 Å, 조밀도는 93%이고 입사각 차이($\Phi_m - \Phi_f$)는 -0.03도이다.

이에 비해 그림 7에 비교해 놓은 NbFD-13의 측정 및 최적맞춤한 타원해석 스펙트럼들은 42 Å의 두께와 void fraction 10%인 유효표면층이 존재하고 있으며, 실제의 입사각이 각각 61.03, 61.12, 61.21도로 측정입사각보다 약 0.02도 큼을 보여 준다. 비정질 실리카보다 두꺼운 유효 표면층이 있어서 Δ 의 변화율은 비정질 실리카의 경우보다 작아서 보다 완만하게 증가하며 동시에 Ψ 의 값은 더 큰 최소 값을 가진다.

LaC-14의 측정 및 최적맞춤한 타원해석 스펙트럼들을 비교해 놓은 그림 8은 NbFD-13과 유사하다. 유효표면층의 두께가 40 Å, void fraction이 10%이며, 59.5, 59.6, 59.7도의 입사각에서 측정한 타원해석 스펙트럼을 최적맞춤하여, 실제 입사각이 약 0.01도 크다는 사실을 알 수 있다.

마지막으로 그림 9는 BK-7의 브루스터각 근방에서 측정된 타원해석 스펙트럼들과 최적맞춤한 타원해석 스펙트럼들을 비교해 놓았다. BK-7의 유효표면층은 void fraction이 10%이고 28 Å의 두께를 가진다. 한편 BK-7에서 가장 두드러지게 관

표 3. 프리즘으로부터 구한 광학유리물질의 굴절률을 식 (3)과 같은 Sellmeier 분산식에 최적맞춤하여 결정된 분산 계수들

| | BK-7 | LaC-14 | NbFD-13 |
|-------------|---------|---------|---------|
| a | 1.64429 | 1.65919 | 1.93564 |
| b | 0.62368 | 1.15996 | 1.22871 |
| λ_0 | 134.449 | 130.944 | 159.938 |

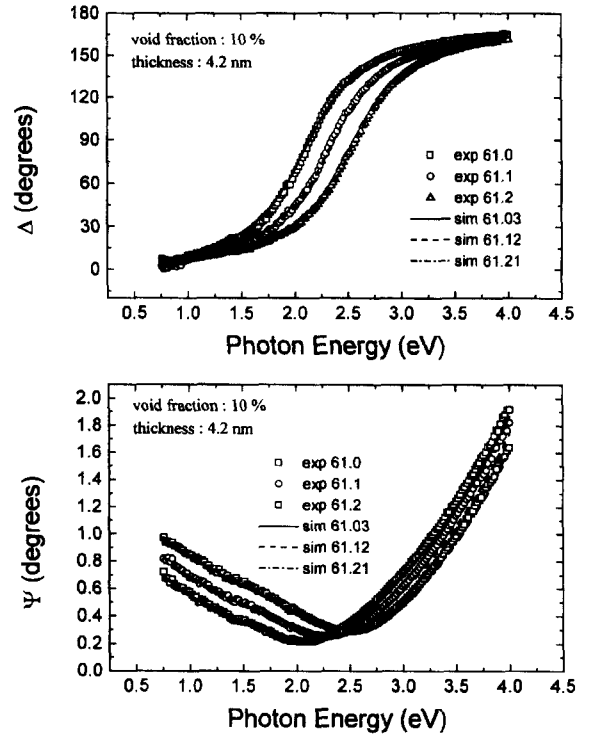


그림 7. NbFD-13의 브루스터각(61.0-61.2도)에서 측정(심벌) 및 최적맞춤(선)한 타원해석 스펙트럼들(Δ , Ψ). 유효표면층의 두께는 42 Å, void fraction은 10%이며 입사각 차이($\Phi_m - \Phi_f$)는 약 0.02도이다.

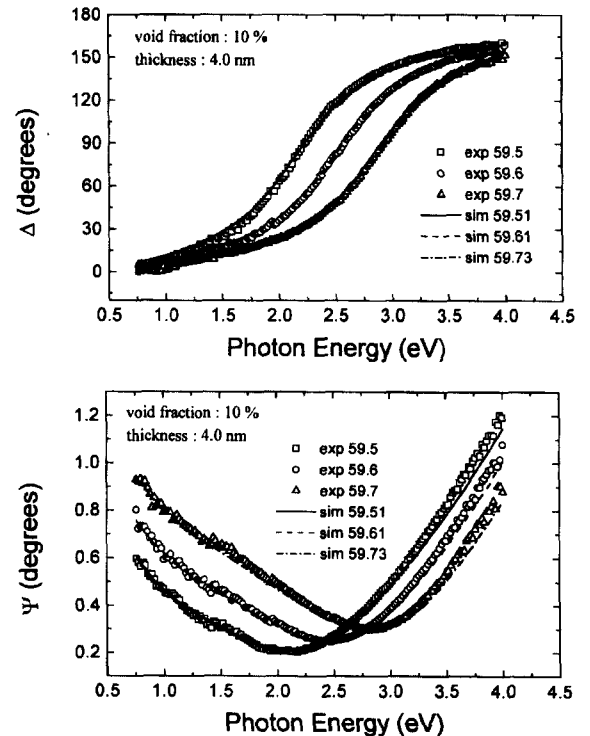


그림 8. LaC-14의 브루스터각(59.5-59.7도)에서 측정(심벌) 및 최적맞춤(선)한 타원해석 스펙트럼들(Δ , Ψ). 유효표면층의 두께는 40 Å, void fraction은 10%이며 입사각 차이($\Phi_m - \Phi_f$)는 약 0.01도이다.

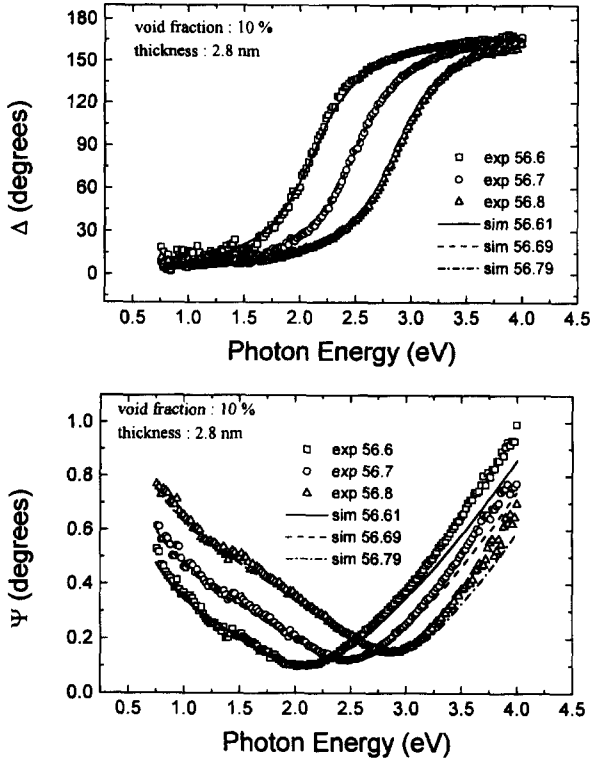


그림 9. BK-7의 브루스터각(56.6-56.8도)에서 측정(심벌) 및 최적맞춤(선)한 타원해석 스펙트럼들(Δ , Ψ), 표면층의 두께는 28 Å, void fraction은 10%이며 입사각 차이 ($\phi_m - \phi$)는 약 -0.01도이다.

찰되는 경향으로 에너지가 커질수록 즉, 파장이 짧은 영역으로 갈수록 타원해석 상수 Ψ 의 측정된 스펙트럼들과 최적맞춤된 스펙트럼들 사이의 간격이 커지고 있다. 이는 프리즘형태의 광학유리 굴절률을 측정할 때의 파장의 최소 값인 480 nm보다 짧은 파장대역 즉, 2.6 eV보다 높은 에너지 영역에서 실제 광학유리의 굴절률과 차이를 가질 수 있으며 이 차이는 빛의 파장이 짧아짐에 따라 커질 수 있기 때문이다. BK-7의 입사각과 실제의 입사각은 각각 59.5, 59.6, 59.7도와 59.51, 59.61, 59.73도로 약 -0.01도의 차이가 있다.

이상과 같이 타원해석 스펙트럼들을 통해 결정된 분광 타원해석기 입사각의 측정치, 보정치와 각각의 시료들에 대한 유

표 4. 광학유리 물질들의 타원해석 스펙트럼들의 입사각 측정치, 보정치 및 유효표면층의 두께와 void fraction(*는 이산화규소의 조밀도 93%에 해당한다)

| 시료 | 입사각 (degree) | | 표면층 | |
|--------------|--------------|-------|-------------------|---------------|
| | 측정치 | 보정치 | void fraction (%) | Thickness (Å) |
| fused silica | 55.5-55.7 | -0.02 | 6 | 13 |
| BK-7 | 56.6-56.8 | -0.01 | 10 | 28 |
| LaC-14 | 59.5-59.7 | +0.01 | 10 | 40 |
| NbFD-13 | 61.0-61.2 | +0.02 | 10 | 42 |
| c-Si | 75.6-76.5 | -0.03 | 7* | 28 |

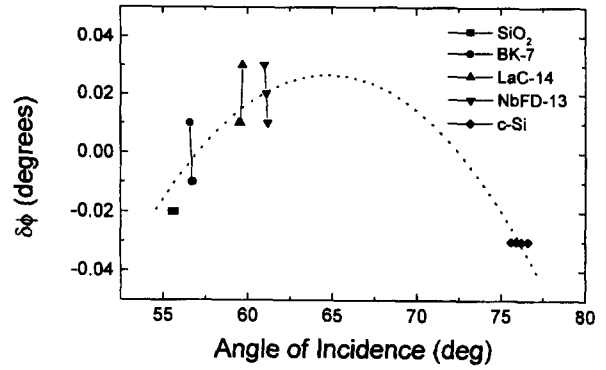


그림 10. 분광 타원해석기의 입사각 증가에 대한 입사각의 오차 ($\delta\phi$) 변화 그래프.

효표면층의 두께 및 void fraction (또는 조밀도)를 표 4에서 요약했고, 분광 타원해석기의 입사각 증가에 대해 브루스터각에서 측정, 분석한 입사각의 차이($\delta\phi$)의 변화경향(점선)을 그림 10에 비교해 놓았다. 입사각이 증가함에 따라 측정 입사각과 실제 입사각의 차이는 비정질 실리카가 -0.02도, BK-7이 -0.01도, LaC-14가 0.01도, NbFD-13이 0.02도로 증가하며 약 65도 근방에서 최대 값이 된 후, 감소하기 시작하여 단결정 규소에서는 -0.03도임을 확인할 수 있다. 이상과 같이 입사각의 변화에 따르는 입사각차이의 변화 경향을 이용하여 분광 타원해석기의 입사각 차이를 최대 ± 0.03 도 이내에서 0.01도의 정밀도로 결정하여 보정하였다.

IV. 요 약

프리즘 형태의 광학유리의 최소 벗어나기각을 측정하여 이로부터 굴절률을 최대 0.00015 오차 범위 내에서 정확하게 결정하였다. 공기의 굴절률은 1.000277이지만 본 연구에서는 1로 가정하였으며 이러한 공기 굴절률의 차이는 타원해석기의 입사각에서 최대 약 0.01도의 차이를 가질 수 있다. 브루스터각 근방에서 측정된 타원해석 스펙트럼들과 최적맞춤한 타원해석 스펙트럼을 비교함으로써 입사각에 따라 타원해석기의 입사각의 차이가 최대 ± 0.03 도임을 확인, 보정하여 분광 타원해석기 입사각을 0.01도의 정밀도로 결정하였다. 동시에 각 시료들의 두께, void 등의 유효표면층에 대한 정보도 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원(KOSEF 98-0702-03-01-3)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

[1] D. E. Aspnes and A. A. Studna, *Appl. Opt.* **10**, 1024-1030 (1971).
 [2] W. E. Quinn, B. P. Van der Gaag, L. M. Schiavone, and D. E. Aspnes, *Appl. Opt.* **31**, 426-427 (1992).
 [3] J. R. Zeidler, R. B. Kohles and N. M. Bashara, *Appl. Opt.*

- 13, 1115-1120 (1974).
[4] T. Easwarakhanthan, and S. Ravelet, *Meas. Sci. Technol.* **7**, 768-775 (1996).
[5] R. M. A. Azzam and N.M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, chap.4, (North-Holland, Amsterdam, 1977).

Precise calibration of the angle of incidence in spectroscopic ellipsometer

H. J. Kim and S. Y. Kim

Dept. of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

Y. W. Lee, H. M. Cho, Y. J. Cho and I. W. Lee

Image Tech. Group, KRISS, Taejon 305-600, Korea

(Received March 17, 1999, Revised manuscript received May 7, 1999)

We proposed a new technique to precisely calibrate the angle of incidence in spectroscopic ellipsometer. The proposed technique can be useful to the thickness measurement of semiconductor thin films and optical thin films. The usefulness has been confirmed experimentally. We cut a block of optical glass into two pieces and made a prism as well as a slab using each piece. The apex angle and the angle of the minimum deviation of prism were measured. From these angles, the refractive index of glass material was calculated. From the analysis of the spectro-ellipsometric data collected near Brewster's angle, we could not only determine the error in the angle of incidence in the spectroscopic ellipsometer, but also calibrated the angle of incidence to the accuracy of 0.01 degree.