실험 문제

반도체 박막의 에너지 띠틈 구하기

I. 들어가며

*반도체*는 대략 전자적 성질이 도체와 절연체 사이 어딘가에 있는 물질이라고 할 수 있다. 반도체의 전자적 성질을 이해하려면 잘 알려진 현상인 *광전 효과*에서 시작할 수 있다. 광전 효과는 물질이 전자기 복사(곧 광자)로부터 충분한 에너지를 흡수해 광전자가 방출되는 양자 전자 현상이다. 빛을 쬐어 금속에서 전자(광전자)를 방출시키는 데 필요한 최소 에너지를 "*일함수*"라 정의한다. 따라서 특성 문턱보다 높은 진동수 ν를 가진 광자, 곧 에너지 $h\nu$(h는 플랑크 상수)가 물질의 일함수보다 큰 광자만이 광전자를 떼어 낼 수 있다.

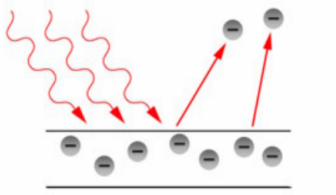


그림 1. 금속판에서 광전자가 방출되는 모습: 들어오는 광자는 물질의 일함수보다 큰 에너지를 가져야 한다.

사실 광전 과정의 일함수 개념은 반도체 물질의 에너지 띠틈 개념과 비슷하다. 고체 물리학에서 띠틈 E_g는 절연체와 반도체에서 원자가띠의 꼭대기와 전도띠의 바닥 사이의 에너지 차이다. 원자가띠는 전자로 완전히 채워져 있고 전도띠는 비어 있지만, 전자가 충분한 에너지(적어도 띠틈 에너지와 같은 에너지)를 얻으면 원자가띠에서 전도띠로 갈 수 있다. 반도체의 전도도는 에너지 띠틈에 크게 의존한다.

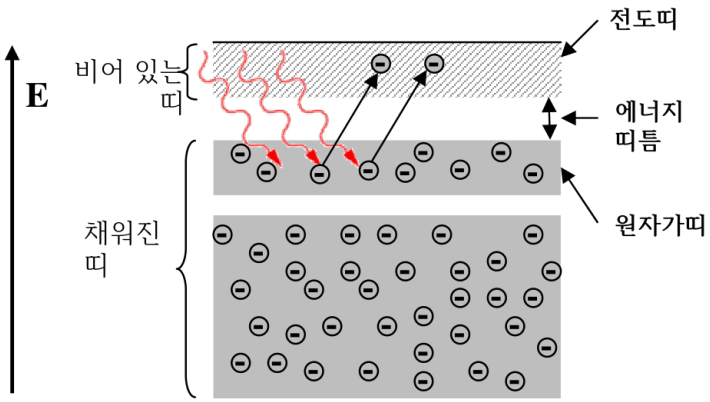


그림 2. 반도체의 에너지 띠 구조.

띠틈 공학은 어떤 반도체 합금의 조성을 조절하여 물질의 띠틈을 조절하거나 바꾸는 과정이다. 최근에는 반도체의 나노 구조를 바꾸어 그 띠틈을 조작할 수 있음이 밝혀졌다.

이 실험에서는 산화철(Fe_2O_3) 나노 입자 사슬을 포함한 박막 반도체의 에너지 띠틈을 광학적 방법으로 구한다. 띠틈을 재려고 투명한 박막의 광 투과 스펙트럼을 써서 그 광흡수 성질을 조사한다. 대략 말하면, 입사 광자의 에너지가 에너지 띠틈과 같아지면 흡수 스펙트럼이 급격히 증가한다.

II. 실험 장치

책상 위에는 다음 품목이 있다.

1. 할로겐램프가 달린 분광계가 든 큰 흰 상자.
2. 시료, 유리 기판, 시료 받침, 회절격자, 광저항이 든 작은 상자.
3. 멀티미터.
4. 계산기.
5. 자.
6. 가운데에 구멍이 뚫린 카드.
7. 빈 라벨 한 세트.

분광계에는 정밀도가 5′인 각도계가 들어 있다. 할로겐램프는 복사원 역할을 하며 분광계의 고정 팔에 설치되어 있다(자세한 내용은 함께 넣은 "장치 설명"을 보라).

작은 상자에는 다음 품목이 들어 있다.

1. 창이 두 개인 시료 받침: 한 창에는 Fe_2O_3 박막을 입힌 유리 기판이, 다른 창에는 아무것도 입히지 않은 유리 기판이 달려 있다.
2. 받침에 단 광저항. 빛 검출기 역할을 한다.
3. 투명한 회절격자(600 line/mm).

> 주: *작은 상자 속 부품의 표면을 만지지 마시오!*

장치의 개략도는 그림 3과 같다.

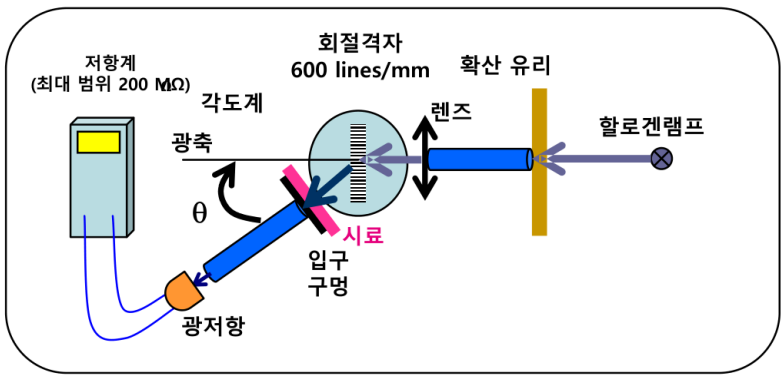


그림 3. 실험 장치의 개략도.

III. 방법

각 파장에서 박막의 투과율 $T_{film}(\lambda)$를 얻으려면 다음 공식을 쓸 수 있다.

$$T_{film}(\lambda) = I_{film}(\lambda)/I_{glass}(\lambda) \qquad (1)$$

여기서 I_{film}과 I_{glass}는 각각 박막을 입힌 유리 기판을 투과한 빛의 세기와 입히지 않은 유리판을 투과한 빛의 세기이다. I의 값은 광저항 같은 빛 검출기로 잴 수 있다. 광저항에서는 입사광의 세기가 커지면 전기 저항이 줄어든다. 여기서 I의 값은 다음 관계로 구할 수 있다.

$$I(\lambda) = C(\lambda)R^{-1} \qquad \mathbf{(2)}$$

여기서 R는 광저항의 전기 저항이고, C는 λ에 의존하는 계수이다.

분광계의 투명한 회절격자는 빛의 서로 다른 파장을 서로 다른 각으로 회절시킨다. 따라서 λ에 따른 T의 변화를 조사하려면, 그림 4처럼 광축(회절격자에 입사하는 빛살의 방향으로 정의)에 대한 광저항의 각(θ')을 바꾸기만 하면 된다.

회절격자의 기본 방정식으로부터

$$n\lambda = d\left[\sin(\theta' - \theta_0) + \sin\theta_0\right] \qquad (3)$$

특정 λ에 해당하는 각 θ'를 얻을 수 있다. n은 회절 차수를 나타내는 정수, d는 회절격자의 주기, θ_o는 회절격자 표면의 법선 벡터가 광축과 이루는 각이다(그림 4 참조). (이 실험에서는 회절격자를 광축에 수직으로 놓아 $\theta_o = 0$이 되게 하려 하지만, 이를 완벽한 정밀도로 이룰 수는 없으므로 이 조정에 따르는 오차는 과제 1-e에서 잰다.)

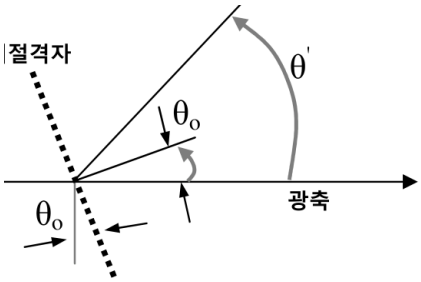


그림 4. 식 3에 나오는 각들의 정의.

실험에 따르면 띠틈 에너지보다 조금 큰 광자 에너지에서는 다음 관계가 성립한다.

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{\eta} \qquad (4)$$

여기서 α는 박막의 흡수 계수, A는 박막의 물질에 의존하는 상수, η는 박막의 물질과 구조의 흡수 메커니즘으로 정해지는 상수이다. 투과율은 잘 알려진 흡수 관계를 통해 α의 값과 관련된다.

$$T_{film} = \exp(-\alpha t) \qquad (5)$$

여기서 t는 박막의 두께이다.

IV. 과제:

0. *장치와 시료 상자(시료 받침이 든 작은 상자)에는 번호가 매겨져 있다. 답안지의 알맞은 칸에* ***장치 번호****와* ***시료 번호****를 적으시오.*

1. 조정과 측정:

1-a	버니어 눈금을 확인하고 최대 정밀도($\Delta\theta$)를 보고하시오.	*0.1 pt*

주: 요청하면 돋보기를 받을 수 있다.

단계 1:
실험을 시작하려면 할로겐램프를 켜서 예열하시오. 실험하는 동안에는 램프를 끄지 않는 것이 좋다. 할로겐램프는 실험 중에 뜨거워지므로 만지지 않도록 조심하시오.

램프를 렌즈에서 될 수 있는 한 멀리 두시오. 그러면 평행한 빛살을 얻는다.

먼저 광저항을 쓰지 않고 각도계의 영점을 대강 맞춘다. (팔 아래의) 나사 18로 회전 팔을 풀고 회전 팔을 눈으로 광축에 맞추시오. 이제 나사 18로 회전 팔을 단단히 고정하시오. 나사 9로 버니어를 풀고 받침대를 버니어 눈금의 0으로 돌리시오. 이제 나사 9로 버니어를 단단히 고정하고, 버니어 미세 조정 나사(나사 10)로 버니어 눈금의 영점을 맞추시오. 회절격자를 받침에 끼우시오. 회절격자가 광축에 대략 수직이 될 때까지 회절격자의 받침대를 돌리시오. 구멍 뚫린 카드를 광원 앞에 놓고, 빛살이 회절격자에 입사하도록 구멍 위치를 맞추시오. 반사된 빛점이 구멍에 떨어지도록 회절격자를 조심스럽게 돌리시오. 그러면 반사된 빛살이 입사 빛살과 일치한다. 이제 나사 12를 조여 회절격자의 받침대를 고정하시오.

1-b	구멍과 회절격자 사이의 거리를 재어 이 조정의 정밀도($\Delta\theta_o$)를 어림하시오.	*0.3 pt*
	이제 회전 팔을 돌려, 가시광선(파랑에서 빨강까지)의 1차 회절이 관찰되는 각의 범위를 구하여 보고하시오.	*0.2 pt*

단계 2:
이제 회전 팔의 끝에 광저항을 설치하시오. 광저항을 써서 장치를 광학적으로 정렬하려면, 나사 18을 풀고 광저항의 저항이 최소가 되도록 회전 팔을 조금 돌리시오. 미세하게 위치를 잡으려면 나사 18을 단단히 고정하고 회전 팔의 미세 조정 나사를 쓰시오.

버니어 미세 조정 나사로 버니어 눈금의 영점을 맞추시오.

1-c	잰 최소 저항값($R_{\min}^{(0)}$)을 보고하시오.	*0.1 pt*
	이제 영점 조정이 더 정확해졌다. 이 새 조정의 정밀도($\Delta\varphi_o$)를 보고하시오. 주: $\Delta\varphi_o$는 이 정렬의 오차, 곧 회전 팔과 광축이 어긋난 정도이다.	*0.1 pt*

➢ **힌트:** 이 과제를 마친 뒤 버니어의 고정 나사들을 조여야 한다. 또한 광저항 받침의 나사를 조여 고정하고, 실험하는 동안 떼지 마시오.

단계 3:
회전 팔을 1차 회절 영역으로 옮기시오. 광저항의 저항이 최소(빛의 세기 최대)가 되는 각을 찾으시오. 수평 나사를 써서 회절격자 받침대의 *기울기*를 조금 바꾸면 저항값을 더 낮출 수 있다.

1-c	관찰한 저항의 최솟값($R_{\min}^{(1)}$)을 알맞은 칸에 보고하시오.	*0.1 pt*

이제 영점 조정을 위해 회절격자가 수직인지 다시 확인해야 한다. 이를 위해서는 단계 1의 반사 일치법을 써야 한다.

중요: 여기부터는 어두운 곳에서 실험하시오(덮개를 닫으시오).

측정: 시료 받침을 회전 팔에 나사로 다시오. 측정을 시작하기 전에 반도체 박막(시료)의 모양을 살펴보시오. 박막이 고르게 입혀진 부분이 회전 팔의 입구 구멍 S_1을 덮도록 시료를 구멍 앞에 놓으시오. 매번 시료의 같은 부분으로 실험하도록, 빈 라벨로 시료 받침과 회전 팔에 알맞은 표시를 하시오.

주의: 높은 저항을 잴 때는 광저항이 안정될 시간을 주어야 한다. 따라서 이 범위에서는 측정마다 3~4분 기다린 뒤 측정값을 기록하시오.

1-d	아무것도 입히지 않은 유리 기판과 반도체 층을 입힌 유리 기판에 대해, 각 θ(광저항과 여러분이 정한 광축 사이의 각으로 각도계에서 읽은 값)의 함수로 광저항의 저항을 재시오. 그런 다음 표 1d를 채우시오. 단계 1b에서 찾은 범위에서 적어도 20개의 데이터 점이 필요하다. 저항계의 알맞은 범위를 써서 측정하시오.	*2.0 pt*
	각 데이터 점에 따르는 오차를 생각하시오. 답은	*1.0 pt*

	저항계에서 직접 읽은 값만을 바탕으로 하시오.	

단계 4:
회전 팔을 광축에 맞추거나 회절격자를 광축에 수직으로 놓는 것을 100% 정밀하게 할 수는 없으므로 지금까지 얻은 정밀도에는 여전히 한계가 있다. 따라서 (회절격자 표면의 법선이 광축에서 벗어난 데(θ_o)서 생기는) 광축 양쪽에서 잰 투과율의 비대칭을 찾아야 한다.
이 비대칭을 재려면 다음 단계를 따르시오.

1-e	먼저 $\theta = -20^\circ$에서 T_{film}을 재시오. 그런 다음 $+20^\circ$ 근처의 다른 몇몇 각에서 T_{film}의 값을 얻으시오. 표 1e를 채우시오(표 1d에서 얻은 값을 써도 된다).	*0.6 pt*
	θ에 대해 T_{film}을 그리고 눈으로 곡선을 그리시오.	*0.6 pt*

곡선에서 T_{film}의 값이 $\theta = -20^\circ$에서 잰 T_{film}과 같아지는 각 γ를 찾으시오 ($\gamma \equiv \theta|_{T_{film}=T_{film}(-20^\circ)}$). 이 각과 $+20^\circ$의 차를 δ로 나타내시오. 곧

$$\delta = \gamma - 20^\circ \qquad (6)$$

1-e	δ의 값을 정해진 칸에 보고하시오.	*0.2 pt*

그러면 1차 회절에 대해 식 (3)은 다음과 같이 간단해진다.

$$\lambda = d\sin(\theta - \delta/2)\,, \qquad (7)$$

여기서 θ는 각도계에서 읽은 각이다.

2. <u>계산:</u>

2-a	식 (7)을 써서 $\Delta\lambda$를 다른 매개변수들의 오차로 나타내시오(d는 정확하며 오차가 없다고 가정한다). 또한 식 (1), (2), (5)를 써서 ΔT_{film}을 R와 ΔR로 나타내시오.	*0.6 pt*

2-b	1차 회절 영역에서 $\Delta\lambda$ 값의 범위를 보고하시오.	*0.3 pt*

2-c	과제 1에서 잰 매개변수들을 바탕으로 각 θ에 대해 표 2c를 채우시오. 파장은 식 (7)로 계산해야 한다.	*2.4 pt*

2-d	R_{glass}^{-1}와 R_{film}^{-1}을 파장의 함수로 같은 그래프에 함께 그리시오. 식 (2)에 따르면 R_{glass}^{-1}와 R_{film}^{-1}의 거동은 각각 I_{glass}와 I_{film}이 어떻게 거동하는지를 꽤 잘 보여 준다.	*1.5 pt*
	표 2d에 R_{glass}와 R_{film}이 최솟값을 갖는 파장을 보고하시오.	*0.4 pt*

2-e	반도체 층(시료)에 대해 파장의 함수로 T_{film}을 그리시오. 이 양은 파장에 따른 박막 투과율의 변화도 나타낸다.	*1.0 pt*

3. 데이터 분석:

식 (4)에 $\eta = 1/2$와 $A = 0.071$ ((eV)$^{1/2}$/nm)을 대입하면 E_g와 t의 값을 각각 eV와 nm 단위로 구할 수 있다. 이는 x-y 좌표계에 알맞은 그래프를 그리고 이 식을 만족하는 영역에서 외삽하여 이룰 것이다.

3-a	$x = h\nu$와 $y = (\alpha t h\nu)^2$으로 놓고 과제 1의 측정값을 써서, 530 nm 근처와 그보다 긴 파장에 대해 표 3a를 채우시오. 데이터 점 하나의 오차 어림을 바탕으로 결과(x와 y)를 올바른 유효 숫자(자릿수)로 나타내시오. $h\nu$는 eV 단위로, 파장은 nm 단위로 계산해야 한다. 표의 맨 윗줄 괄호 안에 각 변수의 단위를 적으시오.	*2.4 pt*

3-b	x에 대해 y를 그리시오. y 매개변수는 박막의 흡수에 해당함에 유의하시오. 530 nm 근처의 선형 영역에 있는 점들에 직선을 맞추시오. 직선을 맞춘 데이터 점들의 가장 작은 x좌표와 가장 큰 x좌표의 값을 보고하여, 식 (4)가 만족되는 영역을 밝히시오.	*2.6 pt*

3-c	이 직선의 기울기를 m이라 하고, 박막 두께(t)와 그 오차(Δt)를 m과 A로 나타내는 식을 구하시오(A에는 오차가 없다고 보라).	*0.5 pt*

3-d	E_g와 t의 값과 그 오차를 각각 eV와 nm 단위로 구하시오. 표 3d를 채우시오.	*3.0 pt*

❖ 분석에 필요한 몇 가지 물리 상수:

- 빛의 속력: $c = 3.00 \times 10^8$ m/s
- 플랑크 상수: $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s
- 전자의 전하: $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C

2PDF(http://www.daneprairie.com)로 만들었다.
록판은 평가용이나 비상업적 용도로만 쓸 수 있다.