

연세대학교 모의 논술시험

자연계열 · 물리

문제 · 예시답안

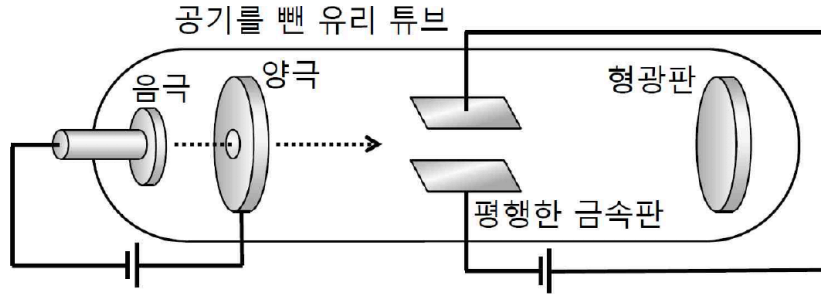
시험 구분
과목
문항 수
제시문
핵심 개념

모의 논술시험 (자연계열)
물리
4문항 (각 10점)
[가]~[라] · 그림 4점
톰슨의 전자 발견 실험과 충격량, 러더퍼드 산란과 운동량 보존,
보어 원자 모형과 수소 선 스펙트럼, 이중 슬릿 간섭,
고체의 에너지띠와 n 형· p 형 반도체

I. 문제

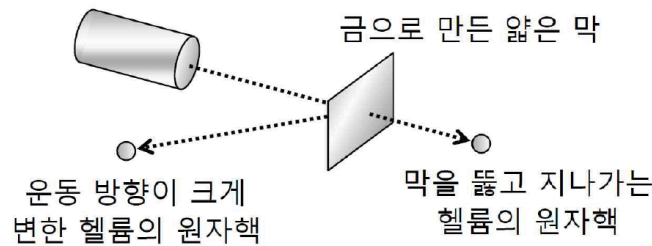
제시문 — 다음 제시문을 읽고 물음에 답하시오.

[가] 공기를 뺀 유리 튜브 안에 [그림 1]과 같이 음극과 양극, 두 평행한 금속판, 형광판을 설치하고 음극과 양극 사이에 높은 전압(V_1)을 가하면 음극에서 나온 입자가 음극과 양극 사이에서 가속되어 오른쪽 방향으로 진행한다. 그리고 두 평행한 금속판 사이의 전압(V_2)에 의해 이 입자가 위쪽으로 휘어져 형광판에 도달한다. 톰슨은 이러한 실험에서 이 입자가 (-) 전하를 띠는 입자임을 알아냈고, 이 입자를 전자라고 이름 붙였다.



[그림 1] 음극선 실험 장치 — 음극·양극 사이의 가속 전압 V_1 , 두 평행한 금속판 사이의 편향 전압 V_2

[나] 헬륨의 원자핵들을 [그림 2]와 같이 금으로 만든 얇은 막을 향하여 보내면 대부분은 금으로 만든 얇은 막을 뚫고 지나갔고 일부는 운동 방향이 큰 각도로 변하였다. 러더퍼드는 이러한 실험 결과로부터 원자의 중심에 (+) 전하를 띠는 원자핵이 존재하고, 전자가 원자핵의 주위를 움직이는 원자 모형을 제안하였다.



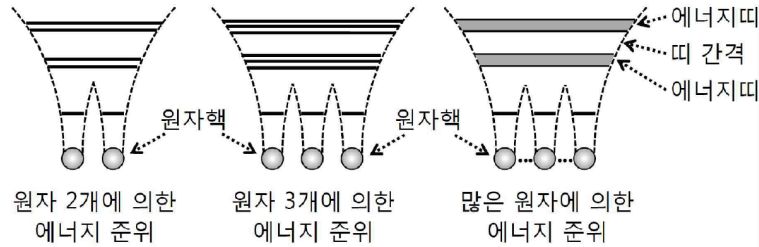
[그림 2] 헬륨의 원자핵을 금박에 쏘는 산란 실험

[다] 수소 원자에서 방출되는 빛은 [그림 3]과 같이 불연속적인 선 스펙트럼이다. 이러한 선 스펙트럼을 설명하기 위해 보어는 전자가 원자핵 주위를 특정한 반지름으로 원운동하는 원자 모형을 제안하였다. 수소 원자에 대한 보어의 원자 모형에서 전자는 -13.6 eV , -3.40 eV , -1.51 eV , -0.85 eV 등과 같은 에너지를 가질 수 있다.



[그림 3] 수소 원자의 선 스펙트럼 (가로축: 파장)

[라] 원자 내에서 전자는 불연속적인 에너지 준위를 가지며, 원자들이 많이 있어도 서로 멀리 떨어져 있으면 전자의 에너지 준위는 원자 1개의 준위와 같다. 원자 2개가 가까이 있으면 전자의 에너지 준위가 2개로 갈라지고, 원자 3개가 가까이 있으면 전자의 에너지 준위가 3개로 갈라진다. 많은 원자들이 규칙적으로 모인 결정에서는 원자 1개에 있던 에너지 준위가 모여 에너지띠가 된다. 에너지띠 사이의 간격을 띠 간격이라고 하는데, 전자는 띠 간격에 해당되는 에너지 준위를 가질 수 없다.



[그림 4] 원자 수가 늘어남에 따른 에너지 준위의 갈라짐과 에너지띠·띠 간격의 형성

[표 1] 물리 상수 및 단위 변환

기본 전하량 e	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$	전자의 질량 m_e	$9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
광속 c	$3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$	양성자의 질량 m_p	$1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$
쿨롱 상수 k	$9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$	중성자의 질량 m_n	$1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$
진공 유전율 ϵ_0	$8.9 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	에너지 단위 변환	$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
플랑크 상수 h	$6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$		

문제 1 음극선의 편향과 형광판이 받는 충격량

10점

[그림 1]의 실험에서 음극과 양극 사이의 전압(V_1)이 $1.0 \times 10^3 \text{ V}$ 이고 두 평행한 금속판 사이의 전압(V_2)이 $1.0 \times 10^2 \text{ V}$ 인 경우에, 두 평행한 금속판 사이를 지나기 전의 운동 방향과 지나간 후의 운동 방향을 비교하여 논하고, 전자 1개가 형광판에 도달하면서 형광판이 받는 충격량의 크기에 대해 논하시오. 단, 두 평행한 금속판 사이의 간격은 $1.0 \times 10^{-1} \text{ m}$ 이고 각각의 금속판은 한 변의 길이가 $1.0 \times 10^{-1} \text{ m}$ 인 정사각형이다.

문제 2 정면충돌에서의 운동량 보존과 원자핵 주위 전자의 속력

10점

[그림 2]의 실험에서 헬륨의 원자핵이 금 원자핵에 충돌할 때 헬륨 원자핵의 운동 방향이 처음 운동 방향과 반대가 되고 금 원자핵은 하나만 운동하게 되었을 때, 충돌 후 헬륨 원자핵의 속도와 금 원자핵의 속도를 비교하여 논하시오. 또한 앞의 러더퍼드의 실험 결과로부터 제안된 보어의 원자 모형에서 전자 1개가 반지름 $1.5 \times 10^{-10} \text{ m}$ 인 원 궤도를 따라 운동하는 경우 금 원자핵의 주위를 도는 전자의 속력에 대해 논하시오. (단, 헬륨의 원자핵은 양성자 2개와 중성자 2개로 구성되어 있고, 금 원자핵은 양성자 79개와 중성자 118개로 구성되어 있다. 금 원자핵의 주위를 도는 전자가 1개라고 가정한다.)

문제 3 이중 슬릿 간섭을 이용한 파장 측정

10점

[그림 3]과 같은 스펙트럼을 이용하여 빛의 파장을 측정하려고 한다. 가시광선 영역의 빛 중에서 파장이 가장 큰 빛의 파장을 이중 슬릿 실험을 이용하여 측정하려고 할 때 필요한 장치와 실험 방법에 대해 논하시오.

문제 4 에너지띠로 본 도체·반도체·절연체와 불순물 반도체

10점

[그림 4]를 이용하여 도체, 반도체, 절연체, n 형 반도체, p 형 반도체를 비교하여 논하시오. 규소(Si)를 이용하여 n 형 반도체와 p 형 반도체를 만들기 위해 필요한 원소에 대해 논하시오.

II. 예시답안

문제 1 음극선의 편향과 형광판이 받는 충격량

가속 전압 · 포물선 운동 · 충격량

운동 방향은 처음 방향에서 위쪽으로 $\tan \theta = V_2/(2V_1) = 0.05$ ($\theta \approx 2.9^\circ$) 만큼 꺾인다. 형광판이 받는 충격량의 크기는 약 $1.7 \times 10^{-23} \text{ N}\cdot\text{s}$ 이다.

(가) 금속판에 들어갈 때의 속력 — 전하가 $-e$ 인 전자가 전압 V_1 로 가속되는 동안 전기력이 한 일이 모두 운동 에너지로 바뀌므로

$$eV_1 = \frac{1}{2}m_e v_0^2 \rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{2eV_1}{m_e}} = \sqrt{\frac{2(1.6 \times 10^{-19})(1.0 \times 10^3)}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 1.9 \times 10^7 \text{ m/s}$$

이다. 이 v_0 는 금속판 사이를 지나는 동안에도 진행 방향(수평) 성분으로 그대로 유지된다.

(나) 금속판 사이에서의 포물선 운동 — 간격 $d = 1.0 \times 10^{-1} \text{ m}$ 인 두 판 사이의 전기장은 균일하고 그 크기는

$$E = \frac{V_2}{d} = \frac{1.0 \times 10^2}{1.0 \times 10^{-1}} = 1.0 \times 10^3 \text{ V/m}$$

이다. 전자의 전하는 $-e$ 이므로 전자가 받는 힘은 전기장과 반대 방향(위쪽)이고 크기는 $F = eE = eV_2/d$ 로 일정하다. 따라서 전자는

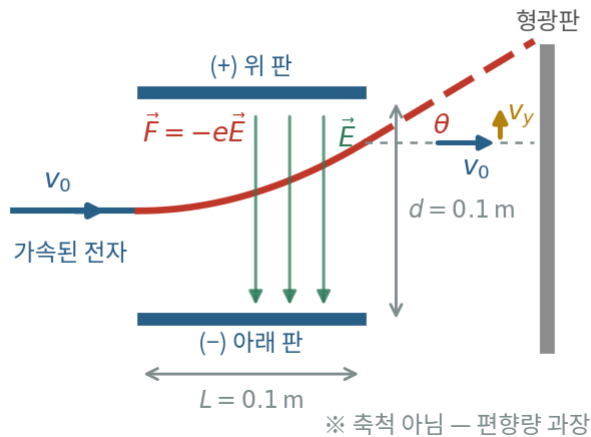
- 수평 방향: 힘이 없어 등속도 v_0
- 수직 방향: 등가속도 $a = F/m_e = eV_2/(m_e d)$

인 포물선 운동을 한다. 판의 한 변의 길이가 $L = 1.0 \times 10^{-1} \text{ m}$ 이므로 판 사이를 지나는 데 걸리는 시간은 $\Delta t = L/v_0$ 이고, 판을 벗어나는 순간의 수직 속도 성분은

$$v_y = a\Delta t = \frac{eV_2}{m_e d} \cdot \frac{L}{v_0} = \frac{eV_2 L}{m_e d v_0}$$

이다. 이 문제에서는 판 간격과 판의 한 변의 길이가 $d = L = 1.0 \times 10^{-1} \text{ m}$ 로 같으므로 $v_y = eV_2/(m_e v_0)$ 이다.

금속판 사이: 포물선 운동 → 나온 뒤: $\tan \theta = v_y/v_0 = V_2/(2V_1) = 0.05$



예시 도해 — 금속판 사이에서는 포물선, 판을 벗어난 뒤에는 θ 만큼 기울어진 직선 운동 (축척 아님 — 실제 편향량은 판 간격의 2.5 %, $\theta \approx 2.9^\circ$ 로 훨씬 작다)

(다) 운동 방향의 비교 — 판을 벗어난 뒤에는 힘이 없으므로 등속 직선 운동을 하며, 처음 운동 방향과 이루는 각 θ 는

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{eV_2 L}{m_e d v_0^2} = \frac{eV_2 L}{d \cdot 2eV_1} = \frac{LV_2}{2dV_1} = \frac{V_2}{2V_1}$$

이다. $v_0^2 = 2eV_1/m_e$ 를 대입하는 순간 전하 e 와 질량 m_e 가 모두 소거되어, 각도가 두 전압의 비만으로 결정된다는 점이 핵심이다. 수치를 넣으면

$$\tan \theta = \frac{1.0 \times 10^2 \text{ V}}{2 \times 1.0 \times 10^3 \text{ V}} = \frac{1}{20} = 0.05, \quad \theta = \tan^{-1} 0.05 \approx 2.9^\circ$$

즉 전자는 판 사이를 지나기 전의 진행 방향에 대해 **위쪽으로 약 2.9° 기울어진 방향으로** 진행한다. 참고로 판 사이에서 전자가 수직으로 치우친 거리는

$$y = \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 = \frac{V_2 L^2}{4dV_1} = \frac{(1.0 \times 10^2)(1.0 \times 10^{-1})^2}{4(1.0 \times 10^{-1})(1.0 \times 10^3)} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

로 판 간격의 절반인 $5.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ 보다 훨씬 작아, 전자는 판에 부딪히지 않고 두 판 사이를 무사히 빠져나온다.

(라) 형광판이 받는 충격량 — 전자가 형광판에 흡수되어 멈추므로 전자의 운동량 변화량의 크기는 충돌 직전 운동량의 크기 $m_e v$ 와 같고, 작용·반작용에 의해 형광판이 받는 충격량의 크기도 이와 같다. 충돌 직전 속력은

$$v = \sqrt{v_0^2 + v_y^2} = v_0 \sqrt{1 + \tan^2 \theta} = v_0 \sqrt{1 + \left(\frac{1}{20}\right)^2} = v_0 \frac{\sqrt{401}}{20}$$

이므로, $m_e v_0 = \sqrt{2m_e e V_1}$ 을 이용하면

$$m_e v = \sqrt{2m_e e V_1} \cdot \frac{\sqrt{401}}{20} = \sqrt{2(9.1 \times 10^{-31})(1.6 \times 10^{-19})(1.0 \times 10^3)} \times \frac{\sqrt{401}}{20} \approx 1.7 \times 10^{-23} \text{ N}\cdot\text{s}$$

$\sqrt{401}/20 \approx 1.001$ 이므로 편향에 의한 속력 증가는 0.1 % 남짓이다. 즉 충격량의 **크기**는 가속 전압 V_1 이 거의 다 결정하고, V_2 는 충격량의 **방향**을 $\theta \approx 2.9^\circ$ 만큼 기울이는 역할을 한다.

문제 2 정면충돌에서의 운동량 보존과 원자핵 주위 전자의 속력

운동량 보존 · 쿨롱 힘과 등속 원운동

충돌 후 금 원자핵의 속력은 헬륨 원자핵 처음 속력의 $8/201 \approx 0.0398$ 배 이하로, 되튀는 헬륨 원자핵의 속력보다 훨씬 작다. 금 원자핵 주위를 도는 전자의 속력은 약 $1.2 \times 10^7 \text{ m/s}$ 이다.

(가) 질량비 — 양성자와 중성자의 질량이 모두 $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 로 같다고 보면, 핵자 수가 곧 질량비를 준다.

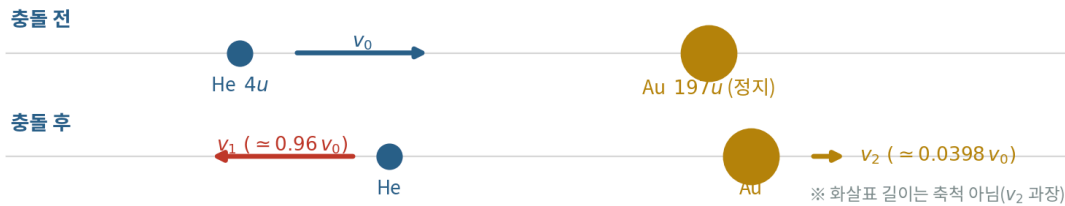
$$m_{\text{He}} : m_{\text{Au}} = (2 + 2) : (79 + 118) = 4 : 197$$

핵자 1개의 질량을 u 라 하고 $m_{\text{He}} = 4u$, $m_{\text{Au}} = 197u$ 로 쓴다.

(나) 운동량 보존 — 정면충돌 동안 두 원자핵 사이의 쿨롱 힘은 내력이므로 계의 운동량이 보존된다. 헬륨 원자핵의 처음 운동 방향을 (+) 로 잡고 충돌 전 속력을 v_0 , 충돌 후 헬륨 원자핵의 속력을 v_1 (방향은 (-)), 금 원자핵의 속력을 v_2 (방향은 (+))라 하면

$$4uv_0 = 4u(-v_1) + 197uv_2 \Rightarrow v_2 = \frac{4}{197}(v_0 + v_1), \quad v_1 = \frac{197}{4}v_2 - v_0$$

$$\text{운동량 보존 } 4v_0 = -4v_1 + 197v_2 + \text{운동에너지 비증가} \rightarrow v_2 = \frac{4}{197}(v_0 + v_1) \leq \frac{8}{201}v_0$$



예시 도해 — 정면충돌 전후, 헬륨 원자핵은 거의 그대로 되튀고 금 원자핵은 아주 느리게 밀려난다 (화살표는 축척 아님 — v_2 를 과장)

(다) 두 속도의 비교 — 충돌로 계의 운동 에너지의 합이 늘어날 수는 없으므로

$$\frac{1}{2}(4u)v_1^2 + \frac{1}{2}(197u)v_2^2 \leq \frac{1}{2}(4u)v_0^2$$

이 성립한다. 좌변에서 금 원자핵의 항을 버리면 $v_1 \leq v_0$ 를 얻고, 이것만 (나)에 넣으면 $v_2 \leq (8/197)v_0 \approx 0.041v_0$ 라는 상한이 나온다.

그러나 이 값은 $v_1 = v_0$ 인 상황을 가정한 것인데, $v_1 = v_0$ 이면 금 원자핵도 움직이므로 운동 에너지가 오히려 늘어나 버려 실제로는 도달할 수 없다. 참된 상한은 **운동량 보존식과 에너지 부등식을 연립해야** 얻어진다. $x = v_1/v_0$ ($x \geq 0$) 로 두고 (나)의 $v_2 = (4/197)(1+x)v_0$ 를 위 부등식에 대입하면

$$4x^2 + 197\left(\frac{4}{197}\right)^2(1+x)^2 \leq 4 \rightarrow 197x^2 + 4(1+x)^2 \leq 197$$

$$\Rightarrow 201x^2 + 8x - 193 \leq 0 \Rightarrow (201x - 193)(x + 1) \leq 0 \Rightarrow x \leq \frac{193}{201}$$

이므로

$$v_2 = \frac{4}{197}(v_0 + v_1) \leq \frac{4}{197}\left(1 + \frac{193}{201}\right)v_0 = \frac{8}{201}v_0 \approx 0.0398v_0$$

즉 금 원자핵의 속력은 어떤 경우에도 헬륨 원자핵 처음 속력의 약 4 %를 넘지 못한다. 이차부등식의 등호가 성립하는 $x = 193/201$ 은 곧 **운동 에너지 부등식의 등호가 성립하는 경우, 즉 탄성 충돌**이고, 이때 v_2 가 최대가 된다.

- $v_1 = (197 - 4)/(197 + 4) \cdot v_0 = (193/201)v_0 \approx 0.96v_0$ (거의 처음 속력 그대로 되튐)
- $v_2 = (2 \times 4)/(197 + 4) \cdot v_0 = (8/201)v_0 \approx 0.0398v_0$ ($v_1/v_2 = 193/8 \approx 24$ 배 차이)

앞의 $8/197v_0$ 는 에너지 조건을 절반만($v_1 \leq v_0$ 만) 쓴 **느슨한 상한**이어서 참값 $8/201v_0$ 보다 크며, 두 조건을 모두 쓰면 상한이 $8/201v_0$ 로 조여진다. 무거운 물체에 가벼운 물체가 정면으로 부딪히면 가벼운 쪽은 속력을 거의 유지한 채 되튀고 무거운 쪽은 거의 움직이지 않는다는 뜻이며, 러더퍼드가 큰 각도로 되튀는 헬륨 원자핵을 근거로 **원자 중심에 무겁고 (+) 전하를 띤 원자핵**이 있다고 결론지은 것이 바로 이 관계 때문이다.

(라) 금 원자핵 주위를 도는 전자의 속력 - 전하량 $+79e$ 인 금 원자핵과 전하량 $-e$ 인 전자 사이의 쿨롱 힘이 구심력 역할을 하여 반지름 $r = 1.5 \times 10^{-10}$ m 인 등속 원운동을 한다고 놓으면

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{k(79e)(e)}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{79ke^2}{m_e r}}$$

이다. 여기서 반지름 r 이 한 번만 남는다는 점에 유의한다. 수치를 대입하면

$$v = \sqrt{\frac{79(9.0 \times 10^9)(1.6 \times 10^{-19})^2}{(9.1 \times 10^{-31})(1.5 \times 10^{-10})}} = \sqrt{1.33 \times 10^{14}} \approx 1.2 \times 10^7 \text{ m/s}$$

이는 광속의 약 4 % 에 해당하는 매우 빠른 속력이다. $v \propto \sqrt{Z/r}$ 이므로 원자 번호가 큰 원자핵($Z = 79$)에 가까이 묶인 전자일수록 더 빠르게 돌며, 수소($Z = 1$)의 같은 반지름 궤도보다 $\sqrt{79} \approx 8.9$ 배 빠르다.

문제 3 이중 슬릿 간섭을 이용한 파장 측정

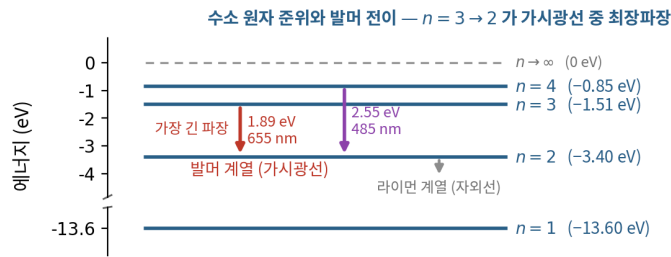
보어 모형 · 광자 에너지 · 이중 슬릿 간섭

측정할 빛은 $n = 3 \rightarrow n = 2$ 전이에서 나오는 $\Delta E = 1.89 \text{ eV}$ 의 붉은빛이며 파장은 $\lambda = 6.55 \times 10^{-7} \text{ m} = 655 \text{ nm}$ ($\approx 6.5 \times 10^{-7} \text{ m}$) 이다. 수소 방전관·단일 슬릿·간격 d 를 아는 이중 슬릿·거리 L 만큼 떨어진 스크린과 자를 준비하고, 밝은 무늬 사이의 간격 Δx 를 재어 $\lambda = d\Delta x/L$ 로 구한다.

(가) 어느 전이의 빛인가 - 제시문 [다]의 준위는 각각 $E_1 = -13.6, E_2 = -3.40, E_3 = -1.51, E_4 = -0.85 \text{ eV}$ 이다. 전자가 $n = i$ 에서 $n = f$ 로 떨어질 때 방출되는 광자의 에너지는 $\Delta E = E_i - E_f$ 이고, $\lambda = hc/\Delta E$ 이므로 ΔE 가 가장 작은 전이가 파장이 가장 긴 빛을 낸다. 주요 전이를 따져 보면

- $n = 2 \rightarrow 1: \Delta E = 10.2 \text{ eV} \rightarrow$ 자외선
- $n = 4 \rightarrow 3: \Delta E = 0.66 \text{ eV} \rightarrow$ 적외선
- $n = 3 \rightarrow 2: \Delta E = 1.89 \text{ eV} \rightarrow$ 붉은빛, **가시광선 중 최장파장**
- $n = 4 \rightarrow 2: \Delta E = 2.55 \text{ eV} \rightarrow$ 푸른빛

이므로 가시광선 영역(대략 $1.8 \sim 3.1 \text{ eV}$)에서 에너지가 가장 작은 것은 $n = 3 \rightarrow n = 2$ 전이이다.



예시 도해 — 수소 원자의 에너지 준위와 발머 계열

(나) 그 빛의 파장 — $\Delta E = (-1.51) - (-3.40) = 1.89 \text{ eV}$ 이므로 $E = hc/\lambda$ 에서

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{1.89 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 6.55 \times 10^{-7} \text{ m} = 655 \text{ nm}$$

유효숫자 두 자리로 반올림하면 $\lambda \approx 6.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ 이며, 붉은빛에 해당한다.

(다) 필요한 장치 — 다음을 준비한다.

- 수소 방전관: 제시문 [다]의 선 스펙트럼을 내는 광원
- 단일 슬릿: 방전관에서 나온 빛을 하나의 선 광원으로 만들어 두 슬릿에 도달하는 빛의 위상 관계를 일정하게(간섭성 있게) 해 준다
- 색 필터 또는 분광 장치: 여러 파장이 섞인 선 스펙트럼에서 붉은빛($n = 3 \rightarrow 2$)만 골라낸다
- 이중 슬릿: 슬릿 사이의 간격 d 를 알고 있어야 한다
- 스크린(또는 감광 필름·광검출기)과 자: 이중 슬릿에서 스크린까지의 거리 L 과 무늬 간격 Δx 를 잰다

(라) 실험 방법과 파장 계산 — 두 슬릿에서 스크린 위 한 점까지의 경로차는 슬릿과 스크린 사이의 거리가 슬릿 간격보다 충분히 클 때($L \gg d$)

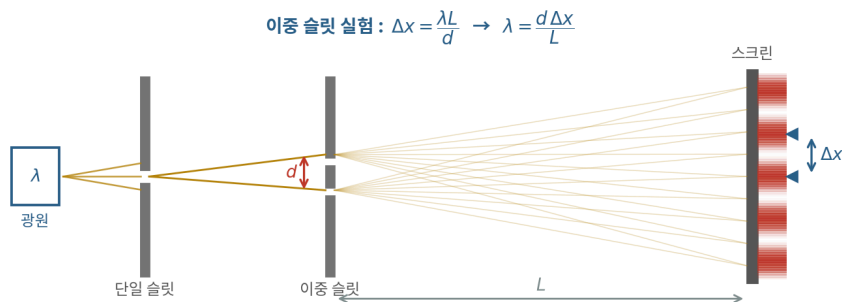
$$\Delta = d \sin \theta \approx d \tan \theta = \frac{dx}{L}$$

이다. 보강 간섭(밝은 무늬)은 경로차가 파장의 정수배일 때 일어나므로

$$\frac{dx_m}{L} = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \rightarrow x_m = m \frac{\lambda L}{d}$$

이고, 이웃한 밝은 무늬 사이의 간격은 m 에 관계없이 일정하다.

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda L}{d} \Rightarrow \lambda = \frac{d \cdot \Delta x}{L}$$

예시 도해 — 광원·단일 슬릿·이중 슬릿·스크린의 배치와 측정량 $d, L, \Delta x$

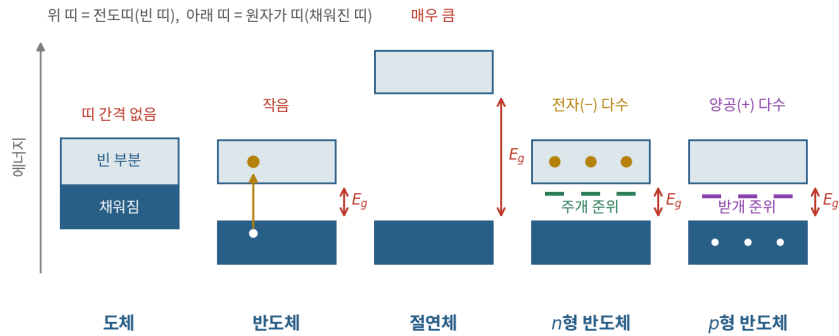
따라서 d 와 L 을 미리 재어 두고 스크린에 생긴 밝은 무늬 사이의 간격 Δx 를 측정하면 파장을 구할 수 있다. 무늬 하나만 재면 오차가 크므로, 가운데 밝은 무늬에서 m 번째 밝은 무늬까지의 거리 x_m 을 재어 $\lambda = dx_m/(mL)$ 로 평균하는 것이 정확하다. 예를 들어 $d = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$, $L = 2.0 \text{ m}$ 로 잡으면 $\Delta x = \lambda L/d \approx 1.3 \times 10^{-2} \text{ m}$ 로 자로 충분히 잴 수 있는 크기가 되며, L 을 크게 하고 d 를 작게 할수록 무늬가 넓게 벌어져 측정 정밀도가 높아진다.

문제 4 에너지띠로 본 도체·반도체·절연체와 불순물 반도체

에너지띠 · 띠 간격 · 도핑

세 물질은 가장 높은 채워진 띠가 부분적으로 찢는지(도체), 가득 찬 뒤 위 띠와의 띠 간격이 작은지(반도체) 큰지(절연체)로 구분된다. 규소에 n 형 반도체를 만들려면 원자가 전자가 5개인 15족 원소(인 P, 비소 As, 안티모니 Sb), p 형 반도체를 만들려면 원자가 전자가 3개인 13족 원소(붕소 B, 알루미늄 Al, 갈륨 Ga, 인듐 In)를 넣는다.

(가) 에너지띠와 전기 전도의 조건 — 제시문 [라]와 같이 많은 원자가 모인 결정에서는 원자 1개의 준위가 무수히 갈라져 에너지띠를 이루고, 띠와 띠 사이에는 전자가 존재할 수 없는 띠 간격이 생긴다. 전자가 전기장에서 에너지를 얻어 이동하려면 바로 위의 빈 에너지 준위로 옮겨 갈 수 있어야 한다. 따라서 전기 전도성은 “전자가 채워진 가장 높은 띠 바로 위에 갈 수 있는 빈 자리가 있는가”로 결정된다.



예시 도해 — 다섯 경우의 에너지띠 구조 비교. 색칠한 띠는 전자로 채워진 부분, 흰 띠는 비어 있는 부분

(나) 도체·반도체·절연체의 비교

도체 전자가 채워진 에너지띠 중 에너지가 가장 높은 띠가 **일부분** 채워져 있다. 같은 띠 안에 바로 위 빈 준위가 이어져 있으므로 아주 약한 전기장으로도 전자가 쉽게 가속되어 전류가 잘 흐른다. 띠 간격을 넘을 필요가 없다.

반도체 가장 높은 띠(원자가 띠)가 전자로 **가득** 차 있고 그 위 빈 띠(전도띠)와의 사이에 띠 간격 E_g 가 있으나 그 값이 **작다**. 상온에서도 일부 전자가 열에너지를 얻어 전도띠로 올라갈 수 있고, 이때 원자가 띠에는 **양공**이 남는다. 전도띠의 전자와 원자가 띠의 양공이 함께 전류를 나르므로 절연체보다 전기 전도성이 크고, 온도가 올라가면 들뜨는 전자가 늘어 전도성이 커진다.

절연체 구조는 반도체와 같지만 띠 간격이 **매우 크다**. 상온의 열에너지로는 전자를 전도띠로 올려 보낼 수 없어 전류가 사실상 흐르지 않는다.

즉 도체와 나머지 둘은 띠 간격의 유무로, 반도체와 절연체는 띠 간격의 크기로 갈린다.

(다) n 형· p 형 반도체

n 형 순수한 반도체에 넣은 불순물 원자가 전자를 내놓아, 전도띠 바로 아래 **주개 준위**가 생긴다. 이 준위의 전자는 아주 작은 에너지만으로 전도띠로 올라가므로, 띠 간격 위의 전도띠에 전자가 존재하게 된다. 주된 전하 운반자가 (-) 전하를 띤 **전자**이다.

p 형 불순물 원자가 전자를 받아들여, 원자가 띠 바로 위에 **받개 준위**가 생긴다. 원자가 띠의 전자가 이 준위로 쉽게 올라가면서 띠 간격 아래의 원자가 띠에 **양공**이 남는다. 주된 전하 운반자가 (+) 전하처럼 행동하는 **양공**이다.

두 경우 모두 순수한 반도체보다 전하 운반자가 훨씬 많아져 전기 전도성이 크게 커지고, 불순물의 양으로 전도성을 조절할 수 있다.

(라) 규소에 넣어야 할 원소 — 규소는 원자가 전자가 4개여서 이웃한 규소 원자 4개와 공유 결합을 이룬다.

- **n 형**: 원자가 전자가 규소보다 **많은**(5개) 원소 — 인(P), 비소(As), 안티모니(Sb) 등 15족 원소. 공유 결합에 쓰이고 남은 전자 1개가 주개 준위를 이루어 전도 전자가 된다.
- **p 형**: 원자가 전자가 규소보다 **적은**(3개) 원소 — 붕소(B), 알루미늄(Al), 갈륨(Ga), 인듐(In) 등 13족 원소. 공유 결합에 전자가 하나 모자라 그 자리가 양공이 되고 받개 준위를 이룬다.

핵심은 **원자가 전자 수의 차이**이다. 규소보다 원자가 전자가 하나 많으면 남은 전자가, 하나 적으면 모자라는 자리(양공)가 생겨 각각 n 형· p 형이 된다.