



Physics Laboratory

실험 2-8. 광전효과를 이용한

플랑크 상수 측정

실험 목적

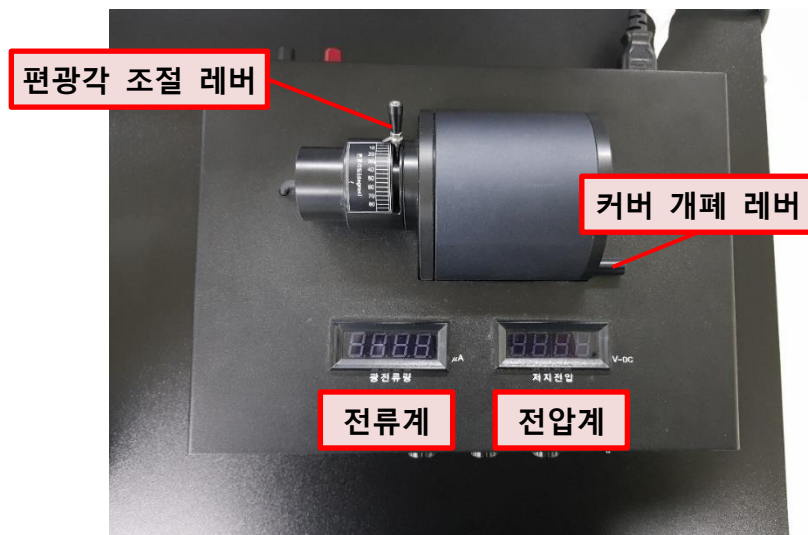
전자기파(빛)가 금속에 입사하면 금속 표면으로부터 전자가 방출되는 현상이 발생할 수 있다. 이 현상을 광전효과(photoelectric effect)라고 하고, 여기서 방출되는 전자를 광전자라고 한다. 광전효과는 아인슈타인이 제시한 양자 모델을 쓰면 잘 설명할 수 있다. 이 실험에서는 광전효과에 의해 전류가 흐를 수 있는 회로를 통해 광전효과의 다양한 특성을 조사하고, 양자 이론에서 중요한 의미를 가지는 플랑크 상수를 측정해 본다.

실험 개요

- 플랑크 상수 측정 장치를 이용해서 광전효과를 관찰한다.
 - 빛의 진동수를 변화시켜가며 정지전압(또는 저지전압)을 측정하고, 실험 결과를 통해 플랑크 상수를 알아낸다.
 - 빛의 세기를 변화시켜가며 광전류와 정지전압을 측정한다.
- 광전효과에 대한 양자 모델을 이해하고 고전 전자기 이론과의 차이점을 알아본다.

실험 방법

실험실에는 플랑크 상수 측정 장치가 준비되어 있다. 그림 1 과 그림 2 를 보며 장치의 구성과 사용 방법을 알아보자.



[그림 1] 플랑크 상수 측정 장치 (top view)



[그림 2] 플랑크 상수 측정 장치 (front view)

1. 전류계와 전압계: 전류계는 광전효과에 의해 광전관(phototube)에 흐르는 전류 (광전류)를 측정해서 보여주고, 전압계는 광전관에 걸리는 역전압을 보여준다.

※참고: 광전관은 개폐 레버로 커버를 열면 볼 수 있고 실제로 광전효과가 일어나는 금속판이 들어 있다. 그러나 실험 중에는 광전관을 노출시키지 않도록 주의한다. 실험실

조명등 빛 등 다른 빛이 실험 결과에 영향을 주는 일이 없도록 하기 위해서다.

2. 편광각 조절 레버: 편광판을 돌려 광전관에 입사하는 빛의 세기를 조절할 수 있다. 광원에서 나오는 빛은 편광판 두 개를 지나 광전관에 입사하게 되는데, 조절 레버를 통해 두 편광판의 편광 방향 사이의 각도를 바꿀 수 있다. 0° 로 맞추었을 때 광전관에 입사하는 빛의 세기가 최대이다. 이를 I_0 라고 하면, 각도가 θ 로 맞추어졌을 때의 세기는 $I_0 \cos^2 \theta$ 가 된다.

3. 「LIGHT SELECT」: 6 개의 버튼이 있다. 왼쪽부터 차례로 적외선(파장 850nm), 빨강(640nm), 주황(585nm), 초록(520nm), 파랑(465nm), 검색(420nm) LED 광원을 켜는 버튼이다.

4. 「GAIN」: 전류 증폭 정도를 조절하는 다이얼이다.

5. 「ZERO ADJ」: 전류계의 영점을 맞출 수 있는 다이얼이다.

6. 「COLLECTOR」: 광전관에 걸리는 역전압의 크기를 조절하는 다이얼이다.

7. 「INT/EXT」: 장치에 내장된 측정 장치를 사용할지, 외부에서 별도 측정 장치를 연결할지 선택하는 스위치다.

권장할 만한 표준적인 실험 방법은 다음과 같다.

<스텝 1> 아무 광원도 선택되어 있지 않고(즉 6 개 광원 버튼 중 아무것도 누르지 않음) 「ZERO ADJ」는 중간 정도, 「GAIN」과 「COLLECTOR」는 최소, 「INT/EXT」에서는 INT를 선택한 상태로 장치의 전원 스위치를 켜다.

<스텝 2> 플랑크 상수 측정 실험 (실험 노트 측정 I)

(1) 편광각 조절 레버를 0° 에 맞춘다.

(2) 빨강 광원을 선택한 다음, 「GAIN」다이얼을 최대로 돌린다. 다 되었으면 광원 버튼을 다시 눌러서 빛을 끈다. 이 때 전류계에 표시된 값이 0이 아니라면 영점이 맞지 않은 것이므로, 0이 될 때까지 「ZERO ADJ」다이얼을 돌린다.

(3) 영점이 맞추어졌으면 다시 광원을 켜다. 「COLLECTOR」 다이얼을 돌려 전류계에 표시된 값이 0이 되는 역전압을 찾는다. 이 값이 정지전압이다. 실험 결과를 기록한 다음 「GAIN」과 「COLLECTOR」 다이얼을 다시 최소로 돌린다.

(4) 다른 색 광원 4 개에 대해서도 정지전압을 측정한다. 광원을 바꿀 때 마다 영점을 새로 확인하는 것을 권장한다.

※참고: 적외선 광원을 선택해서 실험해 보면 광전효과가 일어나지 않는다. 왜 그런지 생각해 보자. 적외선 광원의 작동 여부는 휴대폰 카메라로 확인할 수 있다.

(5) 편광각 조절 레버를 다른 각도(30° 와 60°)로 바꾸고 위 (2)(3)(4) 실험을 반복 수행한다.

<스텝 3> 빛의 세기에 따른 정지전압의 변화 (실험 노트 측정 II)

(1) 광원 중 하나를 선택하고 (가급적 초록, 파랑, 감색 중 하나인 것이 좋다) 영점을 맞춘다.

(2) 편광각 조절 레버를 0° 부터 시작해서 80° 까지 5° 씩 바꾸어가며 영점을 맞추고 정지전압을 측정한다.

<스텝 4> 빛의 세기에 따른 광전류의 변화 (실험 노트 측정 III)

(1) 빨강 광원을 선택하고 영점을 맞춘다.

(2) 편광각 조절 레버를 0° 부터 시작해서 90° 까지 5° 씩 바꾸어가며 광전류를 측정한다. 도중에 「GAIN」 다이얼은 최대인 채로 유지시킨다.

(3) 다른 색 광원 4 개에 대해서도 위 (2)의 실험을 반복한다. (역시 광원을 바꿀 때 마다 영점을 새로 확인하는 것을 권장한다.)

실험 노트의 작성은 다음과 같은 방법으로 하는 것이 좋다.

측정 I

| 실험 광원 | 파장(nm) | 진동수(Hz) | 측정 정지전압 (V) | | |
|-------|--------|---------|-------------|---------|---------|
| | | | 편광각 0° | 편광각 30° | 편광각 60° |
| 빨강 | | | | | |
| 주황 | | | | | |
| 초록 | | | | | |
| 파랑 | | | | | |
| 검색 | | | | | |

광원의 진동수에 따른 정지전압을 그래프로 그린다.

그래프의 기울기를 통하여 플랑크 상수를 구하고, 절편을 통해 일함수를 결정한다.

측정 II (편의상 $I_0 = 1$ 로 한다.)

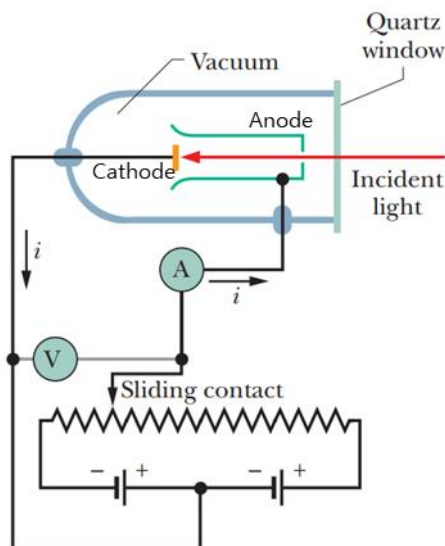
사용 광원:

| 편광각 (°) | 빛의 세기 $I_0 \cos^2 \theta$ | 정지전압 (V) | 편광각 (°) | 빛의 세기 $I_0 \cos^2 \theta$ | 정지전압 (V) |
|------------|------------------------------|-------------|------------|------------------------------|-------------|
| 0 | | | 45 | | |
| 5 | | | 50 | | |
| 10 | | | 55 | | |
| 15 | | | 60 | | |
| 20 | | | 65 | | |
| 25 | | | 70 | | |
| 30 | | | 75 | | |
| 35 | | | 80 | | |
| 40 | | | | | |

측정 III (편의상 $I_0 = 1$ 로 한다.)

| 각도 θ ($^\circ$) | 빛의 세기 $I_0 \cos^2 \theta$ | 광전류 (μA) | | | | |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------|----|----|----|----|
| | | 빨강 | 주황 | 초록 | 파랑 | 검색 |
| 0 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 15 | | | | | | |
| 20 | | | | | | |
| 25 | | | | | | |
| 30 | | | | | | |
| 35 | | | | | | |
| 40 | | | | | | |
| 45 | | | | | | |
| 50 | | | | | | |
| 55 | | | | | | |
| 60 | | | | | | |
| 65 | | | | | | |
| 70 | | | | | | |
| 75 | | | | | | |
| 80 | | | | | | |
| 85 | | | | | | |
| 90 | | | | | | |

배경 이론



[그림 3] 광전효과 실험을 위한 간단한 회로 (Walker, 2020, p. 1012).

광전효과는 금속의 전자 중 일부가 입사한 빛을 통해 에너지를 얻어서 방출되는 현상으로 생각할 수 있다. 고전적인 빛의 파동 이론대로라면 입사 빛의 세기가 강할수록 광전자가 지닐 수 있는 최대 운동에너지는 클 것이다. 그러나 이 실험에서 확인할 수 있듯이, 실제로는 그렇지 않다. 그 밖에도 광전자가 방출되기 위한 입사 빛의 최소 진동수(이를 문턱 진동수라 한다)가 존재하는 점 등, 광전효과에는 고전적인 이론으로는 설명할 수 없는 특징들이 있다.

광전효과는 아인슈타인이 제시한 양자 모델을 사용하면 잘 설명할 수 있다. 이에 따르면 하나의 광전자는 빛의 에너지 양자(주로 광자라 불린다) 하나로부터 에너지를 얻어서 방출된 것이다. 광자 하나의 에너지는 $E = hf$ 로 표현할 수 있다. 여기서 f 는 빛의 진동수, h 는 바로 플랑크 상수이다. 따라서 광전효과는 다음의 식과 같이 기술될 수 있다.

$$hf = K_{\max} + W_0 \quad (1)$$

여기서 K_{\max} 는 방출되는 광전자가 지닐 수 있는 최대 운동에너지, W_0 는 금속의 표면으로부터 전자가 떨어져 나오는데 필요한 에너지로 일함수(work function)라 불린다. 만약 입사 빛의 진동수가 $f_0 = W_0/h$ 보다 작다면, 광전자는 방출될 수 없을

것이다. 운동에너지는 양수여야하기 때문이다. 즉 f_0 가 광전효과의 문턱 진동수라고 할 수 있다. 이 점을 활용해서 문턱 진동수를 측정해서 금속의 일함수를 알아낼 수 있다.

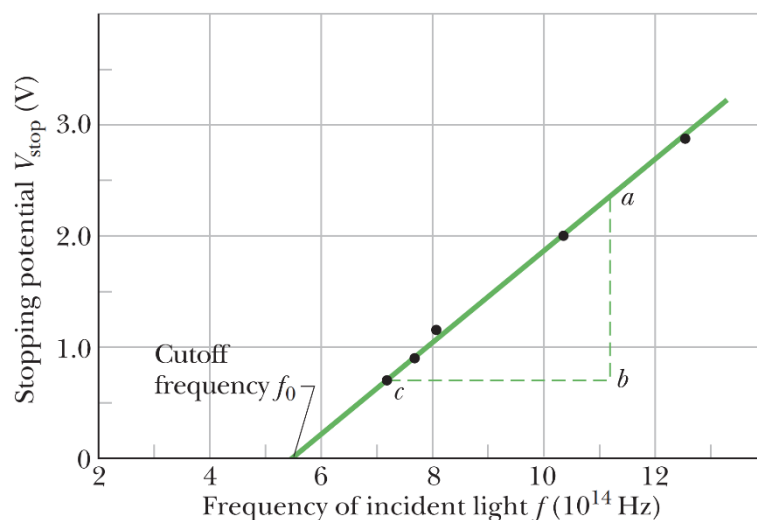
광전자의 최대 운동에너지는 그림 3 처럼 회로를 구성하고 역전압을 조절함으로써 알아낼 수 있다. 광전관의 cathode(광전자가 빠져나감)과 anode(cathode 에서 방출된 광전자가 모여듦) 사이에 걸린 전압이

$$K_{\max} = eV_{\text{stop}} \quad (2)$$

을 만족한다면, 최대 운동에너지를 가진 광전자라 해도 anode 에 도달하면 정지할 것이므로 광전류가 흐르지 않게 된다. ($e = 1.60 \times 10^{-19}\text{C}$) 이 전압 V_{stop} 을 정지전압이라 한다. 이제 식 (1)을 다시 정리해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{\text{stop}} = \frac{h}{e}(f - f_0) \quad (3)$$

입사 빛의 진동수를 바꾸면서 정지전압을 측정하면, 그림 4 와 같이 둘 사이에 선형적인 관계가 성립하게 된다. 그 직선의 기울기가 h/e 라는 사실로부터 플랑크 상수를 구할 수 있다.



[그림 4] 정지전압과 진동수의 선형 관계 (Walker, 2020, p. 1013).

참고문헌

Walker, J., *Halliday & Resnick's Principles of Physics* (11th ed.), 2020.