

Tổng hợp kiến thức Lượng tử ánh sáng: Hiện tượng quang điện & Công thức Anh-xtanh

1. Thuyết lượng tử ánh sáng

a. Giả thuyết Plăng (Planck)

Năm 1900, nhà vật lý người Đức Max Planck cho rằng năng lượng mà mỗi lần một nguyên tử hay phân tử hấp thụ hay phát xạ có giá trị hoàn toàn xác định và bằng **hf**, gọi là lượng tử năng lượng.

- **Công thức:** $\epsilon = hf = hc/\lambda$

- **Giải thích:**

- **ϵ (epsilon):** Lượng tử năng lượng (đơn vị: Jun, J).
- **h :** Hằng số Plăng, $h \approx 6,625.10^{-34}$ J.s.
- **f :** Tần số của ánh sáng (đơn vị: Héc, Hz).
- **c :** Tốc độ ánh sáng trong chân không, $c = 3.10^8$ m/s.
- **λ (lambda):** Bước sóng của ánh sáng trong chân không (đơn vị: mét, m).

- **Ví dụ:** Tính lượng tử năng lượng của ánh sáng màu đỏ có bước sóng $\lambda = 0,76$ μm .

Đổi đơn vị: $\lambda = 0,76 \mu\text{m} = 0,76.10^{-6}$ m.

Áp dụng công thức: $\epsilon = hc/\lambda = (6,625.10^{-34} * 3.10^8) / (0,76.10^{-6}) \approx 2,61.10^{-19} \text{ J}$.

b. Thuyết lượng tử ánh sáng (Thuyết photon)

Phát triển giả thuyết của Plăng, Anh-xơ đã đề ra thuyết lượng tử ánh sáng, hay còn gọi là thuyết photon, với các nội dung chính:

- Ánh sáng được tạo thành bởi các hạt gọi là **photon**.
- Với mỗi ánh sáng đơn sắc có tần số f , các photon đều giống nhau, mỗi photon mang năng lượng là $\epsilon = hf$.
- Trong chân không, photon bay với tốc độ $c = 3.10^8 \text{ m/s}$ dọc theo các tia sáng.
- Mỗi lần một nguyên tử hay phân tử phát xạ hoặc hấp thụ ánh sáng thì chúng phát ra hay hấp thụ một photon. Photon chỉ tồn tại trong trạng thái chuyển động, không có photon đứng yên.
- Cường độ chùm sáng tỉ lệ với số photon phát ra trong một giây.

2. Hiện tượng quang điện ngoài

a. Định nghĩa

Hiện tượng quang điện (ngoài) là hiện tượng ánh sáng làm bật các electron ra khỏi bề mặt kim loại.

b. Thí nghiệm của Héc (Hertz)

Chiếu một chùm sáng hồ quang điện (giàu tia tử ngoại) vào một tấm kẽm tích điện âm gắn trên điện nghiệm, kim điện nghiệm từ từ khép lại, chứng tỏ tấm kẽm đã mất dần điện tích âm. Điều này xảy ra do ánh sáng đã làm bật các electron ra khỏi bề mặt tấm kẽm.

c. Các định luật quang điện

Thực nghiệm cho thấy hiện tượng quang điện tuân theo 3 định luật sau:

1. Định luật 1: Về giới hạn quang điện

Đối với mỗi kim loại, tồn tại một bước sóng giới hạn λ_0 của ánh sáng kích thích, gọi là **giới hạn quang điện**. Hiện tượng quang điện chỉ xảy ra khi bước sóng của ánh sáng kích thích nhỏ hơn hoặc bằng giới hạn đó.

- **Điều kiện xảy ra hiện tượng quang điện:** $\lambda \leq \lambda_0$ hoặc $f \geq f_0$ (với $f_0 = c/\lambda_0$ là tần số giới hạn).
- **Công thoát (A):** Là năng lượng tối thiểu cần thiết để bứt một electron ra khỏi liên kết với mạng tinh thể kim loại. $A = hc/\lambda_0$.
- **Ví dụ 1:** Giới hạn quang điện của Natri là $\lambda_0 = 0,5 \mu\text{m}$. Chiếu vào Natri lần lượt các bức xạ có bước sóng $\lambda_1 = 0,4 \mu\text{m}$ và $\lambda_2 = 0,6 \mu\text{m}$. Bức xạ nào gây ra hiện tượng quang điện?

Ta so sánh: $\lambda_1 = 0,4 \mu\text{m} < \lambda_0 = 0,5 \mu\text{m} \rightarrow$ Bức xạ λ_1 gây ra hiện tượng quang điện. $\lambda_2 = 0,6 \mu\text{m} > \lambda_0 = 0,5 \mu\text{m} \rightarrow$ Bức xạ λ_2 không gây ra hiện tượng quang điện.

- **Ví dụ 2:** Tính công thoát của kẽm, biết giới hạn quang điện của kẽm là $\lambda_0 = 0,35 \mu\text{m}$.

$$A = hc/\lambda_0 = (6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) / (0,35 \cdot 10^{-6}) \approx 5,68 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

2. Định luật 2: Về cường độ dòng quang điện bão hòa

Khi hiệu điện thế U_{AK} đủ lớn, dòng quang điện đạt giá trị bão hòa. Cường độ dòng quang điện bão hòa tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng kích thích.

- **Giải thích:** Cường độ chùm sáng càng mạnh, số photon tới catot trong một giây càng nhiều, làm bật ra càng nhiều electron. Do đó, dòng quang điện bão hòa càng lớn.

3. Định luật 3: Về động năng ban đầu cực đại

Động năng ban đầu cực đại của các electron quang điện không phụ thuộc vào cường độ chùm sáng kích thích, mà chỉ phụ thuộc vào bước sóng (tần số) của ánh sáng kích thích và bản chất của kim loại làm catot.

- **Giải thích:** Động năng của electron phụ thuộc vào năng lượng photon truyền cho nó, mà năng lượng photon ($\epsilon = hf$) chỉ phụ thuộc vào tần số f , không phụ thuộc vào cường độ chùm sáng.

3. Công thức Anh-xtanh (Einstein) về hiện tượng quang điện

a. Nội dung

Theo thuyết photon, mỗi photon khi bị hấp thụ sẽ truyền toàn bộ năng lượng $\varepsilon = hf$ của nó cho một electron. Năng lượng này được electron dùng vào hai việc:

1. Cung cấp một năng lượng tối thiểu **A** (công thoát) để thắng lực liên kết và thoát ra khỏi bề mặt kim loại.
2. Phần năng lượng còn lại (nếu có) trở thành động năng ban đầu của electron khi vừa bật ra, **$W_{đ}$** .

b. Công thức

Phương trình bảo toàn năng lượng cho hiện tượng này chính là công thức Anh-xtanh:

- **Dạng 1:** $hf = A + W_{đ\max}$
- **Dạng 2:** $hc/\lambda = A + (1/2)mv_0^2_{\max}$
- **Giải thích:**
 - **$hf = hc/\lambda$:** Năng lượng của photon ánh sáng kích thích.
 - **$A = hc/\lambda_0$:** Công thoát của electron khỏi kim loại.
 - **$W_{đ\max} = (1/2)mv_0^2_{\max}$:** Động năng ban đầu cực đại của electron quang điện. (m là khối lượng electron, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).

c. Giải thích các định luật quang điện bằng công thức Anh-xtanh

- **Giải thích định luật 1:** Từ công thức, để có hiện tượng quang điện thì electron phải bật ra, tức là $W_{đ0\max} \geq 0$. Suy ra $hf \geq A$, hay $hc/\lambda \geq hc/\lambda_0$, tức là $\lambda \leq \lambda_0$. Điều này hoàn toàn phù hợp với định luật 1.
- **Giải thích định luật 2:** Cường độ chùm sáng tỉ lệ với số photon. Nhiều photon hơn sẽ làm bật nhiều electron hơn, dẫn đến dòng quang điện bão hòa lớn hơn. Công thức Anh-xtanh chỉ áp dụng cho 1 photon và 1 electron, không mâu thuẫn với định luật này.
- **Giải thích định luật 3:** Từ công thức $W_{đ0\max} = hf - A$, ta thấy động năng ban đầu cực đại chỉ phụ thuộc vào tần số f của ánh sáng kích thích và công thoát A (bản chất kim loại), không phụ thuộc vào cường độ chùm sáng. Điều này hoàn toàn phù hợp với định luật 3.

d. Ví dụ áp dụng

- **Ví dụ 1:** Chiếu một bức xạ có bước sóng $\lambda = 0,25 \mu\text{m}$ vào một tấm kim loại có công thoát $A = 3,45 \text{ eV}$. Tính động năng ban đầu cực đại của electron quang điện (biết $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Đổi đơn vị: $A = 3,45 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 5,52 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Năng lượng photon: $\varepsilon = hc/\lambda = (6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) / (0,25 \cdot 10^{-6}) = 7,95 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Áp dụng công thức Anh-xtanh: $W_{đ0\max} = \varepsilon - A = 7,95 \cdot 10^{-19} - 5,52 \cdot 10^{-19} = 2,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

- **Ví dụ 2:** Chiếu ánh sáng có tần số $f = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz vào một kim loại thì các electron bật ra có vận tốc ban đầu cực đại là $v_{0\max} = 6 \cdot 10^5$ m/s. Tìm giới hạn quang điện λ_0 của kim loại đó.

Động năng ban đầu cực đại: $W_{đ0\max} = (1/2)mv_{0\max}^2 = 0,5 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (6 \cdot 10^5)^2 \approx 1,64 \cdot 10^{-19}$ J.

Năng lượng photon: $\varepsilon = hf = 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 1,5 \cdot 10^{15} \approx 9,94 \cdot 10^{-19}$ J.

Công thoát: $A = \varepsilon - W_{đ0\max} = 9,94 \cdot 10^{-19} - 1,64 \cdot 10^{-19} = 8,3 \cdot 10^{-19}$ J.

Giới hạn quang điện: $\lambda_0 = hc/A = (6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) / (8,3 \cdot 10^{-19}) \approx 0,24 \cdot 10^{-6}$ m = 0,24 μ m.

4. Hiện tượng quang điện trong

a. Định nghĩa và cơ chế

Hiện tượng quang điện trong là hiện tượng ánh sáng giải phóng các electron liên kết để chúng trở thành các electron dẫn, đồng thời tạo ra các lỗ trống cùng tham gia vào quá trình dẫn điện. Hiện tượng này xảy ra bên trong một khối chất bán dẫn.

Khác với quang điện ngoài, các electron không bị bật ra khỏi vật mà vẫn ở bên trong khối bán dẫn, làm tăng độ dẫn điện của nó.

b. So sánh Hiện tượng quang điện trong và ngoài

Tiêu chí	Hiện tượng quang điện ngoài	Hiện tượng quang điện trong
Chất xảy ra	Thường xảy ra ở kim loại.	Thường xảy ra ở chất bán dẫn.
Năng lượng kích thích	Cần năng lượng lớn (Công thoát A lớn), thường là ánh sáng tử ngoại.	Cần năng lượng nhỏ hơn (Năng lượng kích hoạt A' nhỏ), có thể là ánh sáng nhìn thấy hoặc hồng ngoại.
Electron sau khi nhận năng lượng	Bị bật ra khỏi bề mặt kim loại.	Trở thành electron dẫn, vẫn ở trong khối chất bán dẫn.

c. Ứng dụng của hiện tượng quang điện

- **Pin quang điện (Pin mặt trời):** Là nguồn điện biến đổi trực tiếp quang năng thành điện năng. Hoạt động dựa trên hiện tượng quang điện trong xảy ra tại một lớp chặn p-n của chất bán dẫn.
- **Quang điện trở:** Là một điện trở làm bằng chất bán dẫn có giá trị điện trở thay đổi khi được chiếu sáng. Hoạt động dựa trên hiện tượng quang điện trong. Khi được chiếu sáng, điện trở của nó giảm mạnh.