

Phần I: Hiện tượng quang điện trong

Hiện tượng quang điện trong là nền tảng vật lý cho hoạt động của nhiều linh kiện quang điện tử, bao gồm quang điện trở. Đây 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 tự do bên trong một chất bán dẫn.

1. Định nghĩa

Hiện tượng quang điện trong là hiện tượng các photon có năng lượng thích hợp khi chiếu vào chất bán dẫn sẽ giải phóng các electron liên kết thành các electron dẫn. Mỗi electron được giải phóng sẽ để lại một lỗ trống mang điện dương. Kết quả là, trong khối bán dẫn xuất hiện các cặp electron - lỗ trống, làm tăng mật độ hạt tải điện và do đó làm tăng độ dẫn điện (giảm điện trở) của khối bán-dẫn.

2. Điều kiện xảy ra

Để hiện tượng quang điện trong xảy ra, năng lượng của photon ánh sáng kích thích (hf) phải lớn hơn hoặc bằng năng lượng cần thiết để giải phóng một electron liên kết, gọi là năng lượng kích hoạt (A).

- **Công thức:** $\epsilon = hf \geq A$
- **Điều kiện về bước sóng:** $\lambda \leq \lambda_0 = hc/A$

Trong đó:

- λ : Bước sóng của ánh sáng kích thích.

- λ_0 : Giới hạn quang điện trong (hay giới hạn quang dẫn) của chất bán dẫn.
- A : Năng lượng kích hoạt (thường nhỏ hơn công thoát của kim loại).
- h : Hằng số Planck (6.625×10^{-34} J.s).
- c : Tốc độ ánh sáng trong chân không (3×10^8 m/s).

Ví dụ 1: Một chất quang dẫn có giới hạn quang dẫn là $1,88 \mu\text{m}$. Tính năng lượng kích hoạt A của chất đó theo đơn vị eV. (Cho $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

Giải: Năng lượng kích hoạt A được tính bằng công thức $A = hc/\lambda_0$. Thay số: $A = (6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) / (1,88 \cdot 10^{-6}) \approx 1,057 \cdot 10^{-19}$ J. Đổi sang eV: $A \approx 1,057 \cdot 10^{-19} / (1,6 \cdot 10^{-19}) \approx 0,66$ eV.

3. So sánh hiện tượng quang điện trong và quang điện ngoài

Dưới đây là bảng so sánh hai hiện tượng quang điện:

Tiêu chí	Hiện tượng quang điện trong	Hiện tượng quang điện ngoài
Bản chất	Photon hấp thụ giải phóng electron liên kết thành electron dẫn. Electron vẫn ở bên trong khối chất.	Photon hấp thụ cung cấp năng lượng cho electron để bứt ra khỏi bề mặt kim loại.
Vật liệu	Chất bán dẫn (Ge, Si, CdS...).	Kim loại (Na, K, Ca, kim loại kiềm...).
Năng lượng cần thiết	Năng lượng kích hoạt A (thường nhỏ).	Công thoát A (thường lớn hơn).
Kết quả	Tạo ra cặp electron - lỗ trống, làm tăng độ dẫn điện.	Electron bị bật ra khỏi bề mặt, tạo ra dòng quang điện.
Giới hạn quang điện	Thường thuộc vùng hồng ngoại.	Thường thuộc vùng ánh sáng nhìn thấy hoặc tử ngoại.

Phần II: Quang điện trở (LDR - Light Dependent Resistor)

Quang điện trở là một linh kiện điện tử có điện trở thay đổi phụ thuộc vào cường độ ánh sáng chiếu vào nó.

1. Cấu tạo

Quang điện trở được cấu tạo từ một lớp màng mỏng chất bán dẫn có độ nhạy cao với ánh sáng (như Cadmium sulfide - CdS, Cadmium selenide - CdSe...). Lớp bán dẫn này được đặt trên một đế cách điện (gốm) và được bảo vệ bởi một lớp vỏ trong suốt để ánh sáng có thể đi qua. Hai đầu của lớp bán dẫn được nối với hai chân kim loại để kết nối vào mạch điện.

2. Nguyên lý hoạt động

Hoạt động của quang điện trở hoàn toàn dựa trên **hiện tượng quang điện trong**.

- **Khi không có ánh sáng (trong tối):** Chất bán dẫn có rất ít hạt tải điện tự do (electron và lỗ trống). Do đó, điện trở của nó rất lớn, có thể lên đến vài $M\Omega$ (Mega-ohm).
- **Khi có ánh sáng chiếu vào:** Các photon ánh sáng có năng lượng đủ lớn sẽ tạo ra các cặp electron - lỗ trống. Mật độ hạt tải điện tăng lên đột ngột, làm cho độ dẫn điện của chất bán dẫn tăng mạnh, dẫn đến điện trở của nó giảm xuống đáng kể, có thể chỉ còn vài chục Ω (Ohm).

Tóm lại, cường độ ánh sáng càng mạnh, điện trở của quang điện trở càng nhỏ.

3. Ứng dụng

Nhờ đặc tính nhạy với ánh sáng, quang điện trở được ứng dụng rộng rãi trong các mạch điện tử tự động.

1. Mạch cảm biến ánh sáng tự động

Đây là ứng dụng phổ biến nhất. Quang điện trở được dùng làm cảm biến để bật/tắt thiết bị dựa vào điều kiện ánh sáng môi trường.

Ví dụ 1: Đèn đường tự động. Mạch điện được thiết kế sao cho khi trời tối, điện trở của LDR tăng cao. Sự thay đổi này kích hoạt một role (relay) để đóng mạch, bật đèn đường. Ngược lại, khi trời sáng, điện trở LDR giảm, role ngắt mạch và đèn tắt. Điều này giúp tiết kiệm năng lượng và tự động hóa hệ thống chiếu sáng công cộng.

Ví dụ 2: Điều chỉnh độ sáng màn hình điện thoại/laptop. Một LDR nhỏ được đặt gần màn hình. Nó đo cường độ ánh sáng môi trường. Khi môi trường sáng, mạch điều khiển sẽ tăng độ sáng màn hình để người dùng dễ nhìn. Khi môi trường tối, nó sẽ giảm độ sáng để tiết kiệm pin và tránh chói mắt.

2. Hệ thống báo trộm

Hệ thống sử dụng một nguồn phát tia hồng ngoại (hoặc laser) chiếu liên tục vào một quang điện trở đặt ở phía đối diện (ví dụ, hai bên cửa ra vào).

Ví dụ: Bình thường, LDR luôn được chiếu sáng nên có điện trở thấp, mạch báo động không hoạt động. Khi có người đi qua, chùm tia sáng bị cắt, ánh sáng không tới được LDR. Điện trở của LDR tăng vọt, sự thay đổi đột ngột này kích hoạt mạch báo động (còi hú, đèn chớp).

3. Máy đo cường độ ánh sáng (Lux meter)

Trong các máy ảnh hoặc thiết bị đo chuyên dụng, LDR được dùng để đo cường độ sáng. Điện trở của LDR thay đổi tương ứng với lượng ánh sáng nhận được. Mạch điện tử sẽ chuyển đổi giá trị điện trở này thành một chỉ số đo lường (ví dụ: lux) hoặc tự động điều chỉnh các thông số của máy ảnh (khẩu độ, tốc độ màn trập) để có bức ảnh đúng sáng.

Phần III: Điốt phát quang (LED - Light Emitting Diode)

Điốt phát quang, hay LED, là một linh kiện bán dẫn có khả năng phát ra ánh sáng khi có dòng điện chạy qua. Đây là quá trình ngược lại với quang điện trở.

1. Cấu tạo

LED về cơ bản là một điốt bán dẫn, được tạo thành từ một khối bán dẫn loại p ghép với một khối bán dẫn loại n (mối nối p-n). Các chất bán dẫn thường dùng là Gallium Arsenide (GaAs), Gallium Phosphide (GaP), Gallium Arsenide Phosphide (GaAsP)... Toàn bộ cấu trúc được đặt trong một vỏ nhựa trong suốt có hình dạng giống thấu kính để tập trung ánh sáng phát ra. LED có hai chân: Anode (+) và Cathode (-).

2. Nguyên lý hoạt động

Hoạt động của LED dựa trên hiện tượng **phát quang điện (electroluminescence)**.

- Khi LED được phân cực thuận (cực dương của nguồn nối với chân Anode, cực âm nối với chân Cathode), một dòng điện chạy qua mối nối p-n.

- Các electron từ vùng n dư thừa sẽ khuếch tán sang vùng p (thiếu electron). Tại đây, chúng gặp các lỗ trống và tái hợp với nhau.
- Trong quá trình tái hợp, electron từ mức năng lượng cao (trên vùng dẫn) chuyển xuống mức năng lượng thấp hơn (lấp vào lỗ trống ở vùng hóa trị). Năng lượng dư thừa được giải phóng dưới dạng các photon ánh sáng.

Màu sắc của ánh sáng phát ra phụ thuộc vào năng lượng được giải phóng, tức là phụ thuộc vào độ rộng vùng cấm (bandgap energy - E_g) của vật liệu bán dẫn.

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

Bằng cách thay đổi thành phần hóa học của các chất bán dẫn, người ta có thể tạo ra các LED có màu sắc khác nhau (đỏ, xanh lá, xanh dương, tử ngoại...). LED trắng thường được tạo ra bằng cách kết hợp một LED xanh dương với một lớp phủ phốt pho màu vàng.

3. Đặc điểm và Ưu điểm

- **Hiệu suất cao, tiêu thụ ít điện năng:** LED chuyển đổi điện năng thành quang năng hiệu quả hơn nhiều so với bóng đèn sợi đốt và huỳnh quang.
- **Tuổi thọ rất cao:** Có thể hoạt động hàng chục nghìn giờ.
- **Kích thước nhỏ gọn:** Dễ dàng tích hợp vào các mạch điện tử.
- **Tốc độ bật/tắt rất nhanh:** Gần như tức thời, phù hợp cho các ứng dụng hiển thị và truyền tín hiệu.
- **Độ bền cao:** Chịu va đập tốt hơn so với các loại bóng đèn thủy tinh.

- **Phát nhiệt ít:** Giảm thiểu nguy cơ cháy nổ và không làm nóng môi trường xung quanh.

4. Ứng dụng

Với nhiều ưu điểm vượt trội, LED đã trở thành công nghệ chiếu sáng và hiển thị chủ đạo hiện nay.

1. Công nghệ chiếu sáng

Ví dụ 1: Đèn LED dân dụng và công nghiệp. Bóng đèn LED được sử dụng rộng rãi trong gia đình, văn phòng, nhà xưởng, đèn đường... thay thế cho đèn sợi đốt và huỳnh quang nhờ khả năng tiết kiệm điện lên đến 80% và tuổi thọ cao.

Ví dụ 2: Đèn pha ô tô, xe máy. LED cho ánh sáng mạnh, tập trung, thời gian đáp ứng nhanh và thiết kế linh hoạt, giúp tăng tính an toàn và thẩm mỹ cho phương tiện.

2. Thiết bị hiển thị

Ví dụ 1: Màn hình TV, điện thoại, máy tính. Các màn hình hiện đại (LED, OLED, QLED) đều sử dụng công nghệ LED. Hàng triệu điểm ảnh LED siêu nhỏ (hoặc các cụm RGB - Đỏ, Xanh lá, Xanh dương) kết hợp với nhau để tạo ra hình ảnh sắc nét, màu sắc sống động.

Ví dụ 2: Bảng quảng cáo điện tử, bảng tỷ số thể thao. Các ma trận LED lớn cho phép hiển thị hình ảnh, video động với độ sáng cao, có thể nhìn rõ từ xa và dưới ánh sáng mặt trời.

3. Đèn báo và chỉ thị

Ví dụ: Đèn báo nguồn (power), đèn báo sạc pin, đèn báo hoạt động của ổ cứng trên laptop, TV, và hầu hết các thiết bị điện tử khác đều dùng LED vì kích thước nhỏ, tiêu thụ điện không đáng kể và độ bền cao.

4. Truyền dữ liệu

Ví dụ: Điều khiển từ xa (remote). Các thiết bị điều khiển TV, điều hòa... sử dụng một LED hồng ngoại (phát ra ánh sáng không nhìn thấy) để phát tín hiệu điều khiển dưới dạng các xung ánh sáng. Mắt nhận trên thiết bị sẽ giải mã các xung này thành lệnh.

Phần IV: Bảng so sánh tổng kết Quang điện trở và Điốt phát quang

Tiêu chí	Quang điện trở (LDR)	Điốt phát quang (LED)
Nguyên lý cơ bản	Hiện tượng quang điện trong.	Hiện tượng phát quang điện.
Chức năng	Biến đổi tín hiệu quang thành tín hiệu điện (thay đổi điện trở).	Biến đổi tín hiệu điện thành tín hiệu quang (phát ra ánh sáng).
Tương tác với ánh sáng	Nhận ánh sáng để thay đổi tính chất điện. Là một cảm biến quang.	Phát ra ánh sáng khi có dòng điện đi qua. Là một nguồn phát quang.
Dòng năng lượng	Quang năng → Thay đổi nội năng → Thay đổi tính chất điện.	Điện năng → Quang năng.
Ứng dụng chính	Mạch cảm biến ánh sáng, báo trộm, máy đo sáng, điều khiển tự động.	Chiếu sáng, màn hình hiển thị, đèn báo, truyền tín hiệu.