

CHƯƠNG 9. PIN MẶT TRỜI

Solar Cells, SCs

Giảng viên: Nguyễn Đức Cường

Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

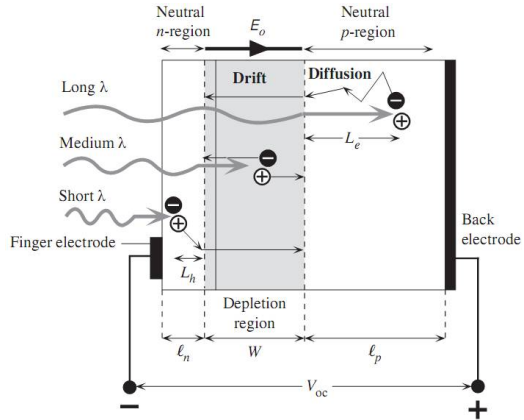
Email: cuongnd@vnu.edu.vn

Ngày 15 tháng 11 năm 2021

1 CHƯƠNG 9. PIN MẶT TRỜI

Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện

- Pin mặt trời là linh kiện chuyển đổi trực tiếp năng lượng ánh sáng thành năng lượng điện.
- Pin mặt trời thường được chế tạo từ chuyển tiếp Schottky hoặc pn .
- Với chuyển tiếp pn , thường lớp ở mặt hứng ánh sáng có độ dày nhỏ và được pha tạp nặng (ví dụ lớp n). Vùng nghèo nằm chủ yếu trong lớp p . Điện cực tiếp xúc với lớp n cần phải cho phép ánh sáng đi qua, và đảm bảo được điện trở nhỏ (finger electrode). Một lớp **chống phản xạ (antireflection coating)** được phủ lên trên lớp n để cho phép nhiều ánh sáng hơn đi vào trong linh kiện.

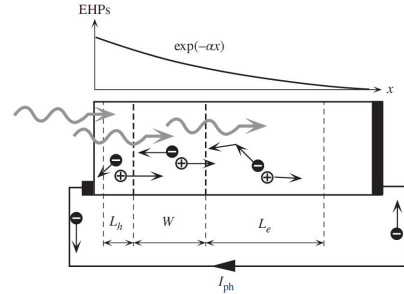


Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện

- Lớp n rất mỏng nên sự hấp thụ photon và sinh cặp điện tử-lỗ trống xảy ra chủ yếu trong vùng nghèo (độ rộng W) và vùng trung hòa của lớp p (độ rộng ℓ_p). Các cặp điện tử-lỗ trống quang sinh được phân tách bởi điện trường trong E_0 . Điện tử trôi về vùng trung hòa của lớp n và khiến nó trở thành cực âm, trong khi đó lỗ trống trôi về vùng trung hòa của lớp p và khiến nó trở thành cực dương. Giữa hai cực của pin xuất hiện một hiệu điện thế gọi là **thế hở mạch (open-circuit voltage)**. Khi nối với tải, sẽ có dòng điện chạy ở mạch ngoài.
- Khi linh kiện không được chiếu sáng, hiệu điện thế giữa hai điện cực bằng 0 do điện thế trong V_0 được khử bằng điện thế tiếp xúc giữa kim loại và bán dẫn tại hai điện cực.
- Photon có bước sóng dài được hấp thụ tại vùng trung hòa của lớp p và cặp điện tử-lỗ trống sinh ra tại đó chỉ có thể khuếch tán do không có điện trường. Nếu thời gian tái hợp trung bình của điện tử là τ_e , thì nó có thể khuếch tán một quãng đường trung bình là $L_e = \sqrt{2D_e\tau_e}$, trong đó D_e là hệ số khuếch tán của nó tại vùng p . Chỉ những điện tử được sinh ra trong khoảng cách L_e tính từ biên phải của vùng nghèo mới có thể tới được vùng nghèo và được kéo về phía n dưới tác dụng của điện trường E_0 .

Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện

- Độ dài khuếch tán của hạt tải thiểu số cần lớn, vì vậy cần chọn lớp p ở phía sau (trong đó điện tử là hạt tải thiểu số), vì trong Si, độ dài khuếch tán của điện tử lớn hơn của lỗ trống. Tương tự như vậy, lỗ trống sinh ra do bước sóng ngắn tại mặt trước (trong lớp n mỏng) nằm trong độ dài khuếch tán L_h có thể khuếch tán đến lớp nghèo và được điện trường E_0 đẩy sang lớp p .
- **Dòng quang điện (photocurrent)** I_{ph} được tạo nên bởi các hạt tải quang sinh nằm trong vùng không gian có bề rộng $L_h + W + L_e$.
- Ở trạng thái hoạt động ổn định, không có dòng điện thực tế chạy qua pin mặt trời khi hở mạch. Lúc này, dòng quang điện được bù trừ hoàn toàn bởi dòng điện chạy ở mạch ngoài theo chiều ngược lại.

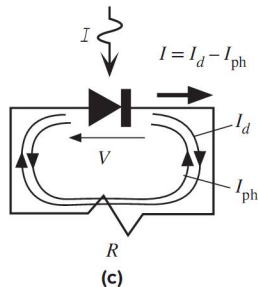
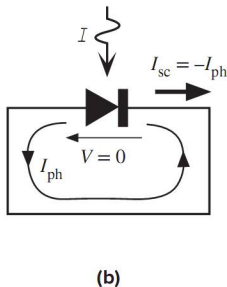
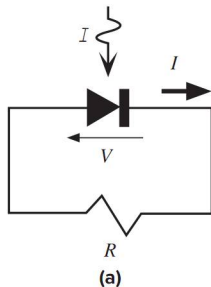


Sự phụ thuộc của nồng độ cặp điện tử-lỗ trống vào khoảng cách ở trạng thái **ngắn mạch (short circuit)**, với α là hệ số hấp thụ tại bước sóng đang xét.

Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện

- Các cặp điện tử-lỗ trống sinh ra bởi photon năng lượng cao chủ yếu ở vùng n gần vùng bề mặt và nằm ngoài độ dài khuếch tán L_h tính từ vùng nghèo. Những hạt tải này dễ dàng bị tái hợp do thời gian sống ở vùng n rất ngắn (do sự pha tạp mạnh). Vì vậy độ dài ℓ_n của vùng n (khoảng $0.2 \mu\text{m}$) thường nhỏ hơn độ dài khuếch tán của lỗ trống L_h .
- Đối với bước sóng dài ($1\text{--}1.2 \mu\text{m}$), hệ số hấp thụ α của Si nhỏ và độ sâu hấp thụ ($1/\alpha$) thường lớn hơn $100 \mu\text{m}$. Để hấp thụ được các photon này, cần có lớp p dày, đồng thời hạt tải thiểu số (điện tử) cũng cần có độ dài khuếch tán L_e dài. Lớp p thường có độ dày khoảng $200\text{--}500 \mu\text{m}$ và L_e nhỏ hơn giá trị này.

Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện



Pin mặt trời nối với tải ngoài R và định nghĩa các cực và chiều dương của dòng điện.

- Dòng ngắn mạch là:

Pin mặt trời ở trạng thái ngắn mạch. Dòng điện là dòng quang điện I_{ph} .

Pin mặt trời nối với tải ngoài R và hướng của dòng quang điện I_{ph} và dòng đi-ốt I_d .

$$I_{sc} = -I_{ph} = -K\mathcal{I}, \text{ với } \mathcal{I} \text{ là cường độ ánh sáng,}$$

K là hằng số phụ thuộc từng loại linh kiện

Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện

- Nếu pin mặt trời không bị ngắn mạch mà được nối với tải R , một điện thế dương xuất hiện dọc theo chuyển tiếp pn do kết quả của dòng điện chạy qua nó. Điện thế này làm giảm điện thế trong của chuyển tiếp pn và dẫn đến sự tiêm và khuếch tán của hạt tải thiểu số như trong đi-ốt thông thường. Vì vậy ngoài I_{ph} , qua pin mặt trời còn có dòng đi-ốt thuận I_d :

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{\eta k T} \right) - 1 \right]$$

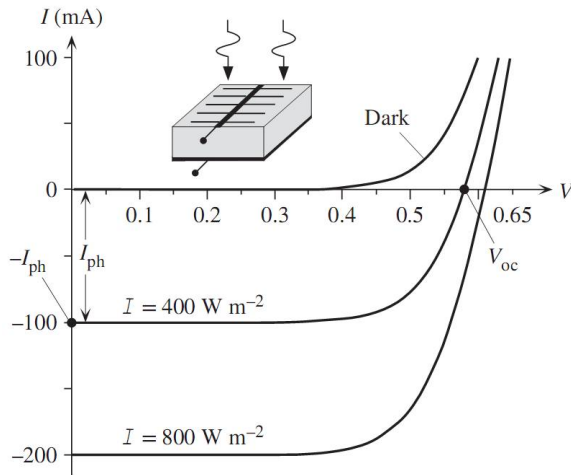
trong đó I_0 là dòng ngược bão hòa và η là hệ số lý tưởng ($1 \leq \eta \leq 2$).

- Tổng dòng điện chạy qua pin mặt trời:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{\eta k T} \right) - 1 \right]$$

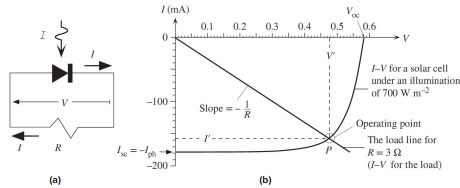
- Trong trường hợp lý tưởng, đường đặc trưng I - V của pin mặt trời khi chiếu sáng có thể thu được bằng cách tịnh tiến đường đặc trưng I - V trong tối xuống một khoảng I_{ph} , tùy thuộc vào cường độ ánh sáng tới.

Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện



Đặc trưng I - V của một pin mặt trời Si dưới ánh sáng có cường độ khác nhau. Linh kiện quang điện luôn hoạt động ở vùng có dòng điện âm.

Nguyên tắc hoạt động của linh kiện quang điện



Đặc trưng I - V của pin mặt trời khi nối với tải ngoài R với $P(V', I')$ là **điểm vận hành (operating point)** của pin.

- Công suất cung cấp cho tải:

$$P = V' I', P_{\max} \text{ khi } I' = I_m \text{ và } V' = V_m$$

- **Hệ số điền đầy (Fill Factor)** đặc trưng cho sự tiệm cận của đường đặc trưng I - V tới hình chữ nhật giới hạn bởi $|I_{sc}|$ và V_{oc} (trường hợp lý tưởng):

$$FF = \frac{I_m V_m}{|I_{sc}| V_{oc}}$$

Ví dụ 1

Một pin mặt trời được nối với tải ngoài $3\ \Omega$. Pin có diện tích $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ và nó được chiếu sáng bởi ánh sáng có cường độ 700 W m^{-2} . Tìm giá trị dòng điện và điện thế trong mạch. Tìm công suất cung cấp cho tải, **hiệu suất chuyển đổi năng lượng (PCE: power conversion efficiency)** và hệ số điền đầy của pin.

Lời giải

Đường I - V của tải có độ dốc $1/(3\ \Omega)$. Nó cắt đường đặc trưng I - V của pin ở giá trị $I' = 157\text{ mA}$ và $V' = 0.475\text{ V}$. Đây là các giá trị dòng điện và điện thế trong mạch pin mặt trời có nối tải. Công suất cung cấp cho tải là:

$$P_{ra} = I'V' = (157 \times 10^{-3})(0.475\text{ V}) = 0.0746\text{ W}$$

Công suất ánh sáng chiếu tới là:

$$\begin{aligned} P_{\text{vào}} &= (\text{Cường độ ánh sáng})(\text{Diện tích bề mặt}) \\ &= (700\text{ W m}^{-2})(0.025\text{ m})^2 = 0.438\text{ W} \end{aligned}$$

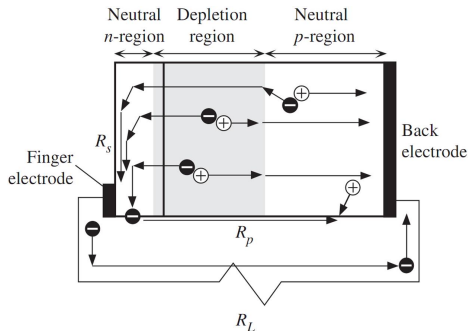
Hiệu suất chuyển đổi năng lượng là:

$$\text{PCE} = (100\%) \frac{P_{\text{ra}}}{P_{\text{vào}}} = (100\%) \frac{(0.0746\text{W})}{(0.438\text{W})} = 17.0\%$$

Hiệu suất chuyển đổi năng lượng sẽ tăng khi tải được điều chỉnh sao cho pin mặt trời cung cấp được công suất cao nhất, tuy nhiên sự thay đổi là không đáng kể nếu hình chữ nhật có diện tích $I'V'$ đã gần đạt được cực đại. Hệ số điền đầy cũng có thể tính toán được do điểm P trong đồ thị nằm gần với điểm vận hành tối ưu (cung cấp công suất cao nhất), trong đó diện tích hình chữ nhật $I'V'$ là cực đại:

$$\text{FF} = \frac{I_m V_m}{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}} = \frac{(157 \text{ mA})(0.475 \text{ V})}{(178 \text{ mA})(0.58 \text{ V})} = 0.722 \text{ hay } 72.2\%$$

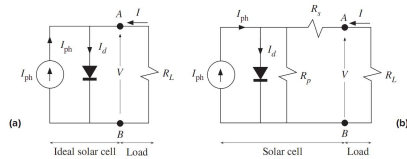
Điện trở nối tiếp (series) và điện trở song song (shunt)



Điện trở nối tiếp và điện trở song song và số phận khác nhau của các cặp điện tử-lỗ trống

- Nguyên nhân của điện trở nối tiếp (R_s): điện trở tiếp xúc giữa các lớp bán dẫn và điện cực. Trong trường hợp đang xét là điện trở đối với điện tử.
- Nguyên nhân của điện trở song song (R_p): một phần hạt tải quang sinh chạy qua các bề mặt tinh thể trong các linh kiện đa tinh thể, thay vì chạy qua tải ngoài R_L .

Điện trở nối tiếp (series) và điện trở song song (shunt)



Mạch tương đương của pin mặt trời: (a) Pin mặt trời chuyển tiếp pn lý tưởng. (b) Pin mặt trời với điện trở nối tiếp R_s và điện trở song song R_p .

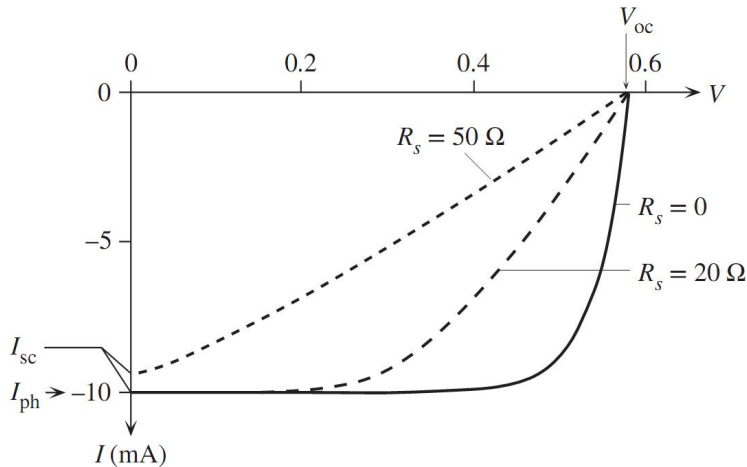
- Phương trình Shockley đối với pin mặt trời lý tưởng:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{\eta(kT/e)} \right) - 1 \right]$$

- Phương trình Shockley đối với pin mặt trời thực tế (có R_s và R_p):

$$I = -I_{ph} + I_0 \left[\exp \left(\frac{V - IR_s}{\eta(kT/e)} \right) - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_p}$$

Điện trở nối tiếp (series) và điện trở song song (shunt)



Ảnh hưởng của R_s lên đường đặc trưng I - V và hiệu suất (chủ yếu thông qua FF) của pin mặt trời.

Vật liệu, linh kiện và hiệu suất của pin mặt trời

Bảng: Hiệu suất của pin mặt trời đơn chuyển tiếp (single-junction) đo dưới phổ AM1.5G (1000 W/m²)
(Nguồn: *Solar cell efficiency tables (version 52) 2018*, DOI: 10.1002/pip.3040)

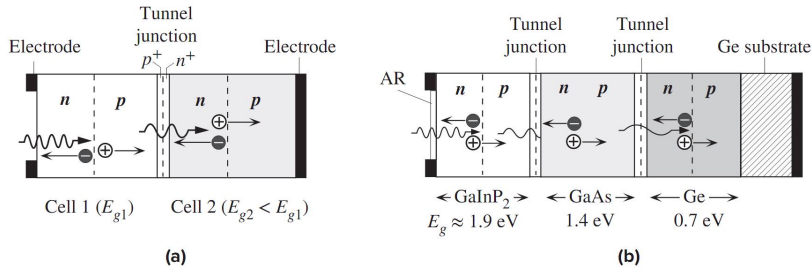
| Phân loại | E_g (eV) | V_{oc} (V) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF (%) | PCE (%) |
|--|------------|--------------|--------------------------------|--------|------------|
| Silic | | | | | |
| Si đơn tinh thể ² | 1.1 | 0.738 | 42.65 | 84.9 | 26.7 ± 0.5 |
| Si đa tinh thể ² | 1.1 | 0.6742 | 41.08 | 84.9 | 22.3 ± 0.4 |
| Nhóm III-V | | | | | |
| GaAs màng mỏng | 1.42 | 1.122 | 29.68 | 86.5 | 28.8 ± 0.9 |
| GaAs đa tinh thể ² | 1.42 | 0.994 | 23.2 | 79.7 | 18.4 ± 0.5 |
| InP đơn tinh thể ² | 1.34 | 0.939 | 31.15 | 82.6 | 24.2 ± 0.5 |
| Chalcogenide màng mỏng (S, Se, Te, Po, v.v.) | | | | | |
| CIGS | 1.2–1.4 | 0.744 | 38.77 | 79.5 | 22.9 ± 0.5 |
| CdTe | 1.5 | 0.8759 | 30.25 | 79.4 | 21.0 ± 0.4 |

Vật liệu, linh kiện và hiệu suất của pin mặt trời

Bảng: Hiệu suất của pin mặt trời đơn chuyển tiếp (single-junction) đo dưới phổ AM1.5G (1000 W/m²)
(Nguồn: *Solar cell efficiency tables (version 52) 2018*, DOI: 10.1002/pip.3040) (tiếp)

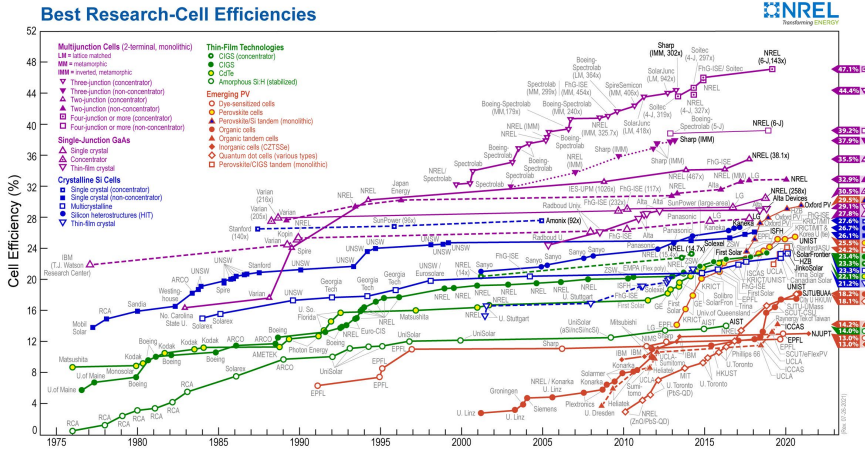
| Phân loại | E_g (eV) | V_{oc} (V) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF (%) | PCE (%) |
|------------------------------------|------------|--------------|--------------------------------|--------|-----------|
| Vô định hình | | | | | |
| Si vô định hình | 1.1 | 0.896 | 16.36 | 69.8 | 10.2± 0.3 |
| Perovskite | | | | | |
| Perovskite | 1.50–1.55 | 1.125 | 24.92 | 74.5 | 20.9± 0.7 |
| Sử dụng chất màu nhạy quang (DSSC) | | | | | |
| DSSC | – | 0.744 | 22.47 | 71.2 | 11.9± 0.4 |
| Hữu cơ | | | | | |
| Hữu cơ | – | 0.780 | 19.30 | 74.2 | 11.2± 0.3 |

Vật liệu, linh kiện và hiệu suất của pin mặt trời



- Pin mặt trời **xếp chồng (tandem)** hay **đa chuyển tiếp (multijunction)** là những linh kiện quang điện hiệu suất cao dựa trên cấu trúc dị chất, bao gồm 2 hoặc nhiều hơn **chuyển tiếp đơn (single-junction)** xếp chồng lên nhau, được nối với nhau bởi **chuyển tiếp xuyên hầm (tunnel junction)**.
- Photon năng lượng cao được hấp thụ bởi pin nằm trước (E_g lớn), photon năng lượng thấp còn lại được hấp thụ bởi các pin nằm sau (E_g nhỏ). Cấu trúc này làm tăng hiệu suất thu nhận ánh sáng và chuyển đổi thành dòng điện của pin.

Vật liệu, linh kiện và hiệu suất của pin mặt trời



Đồ thị mô tả sự phát triển của các thế hệ pin mặt trời và hiệu suất tương ứng tính từ năm 1976 đến nay (luôn cập nhật).

The End