

CHƯƠNG 8. DI-ỐT PHÁT QUANG

Light Emitting Diodes, LEDs

Giảng viên: Nguyễn Đức Cường

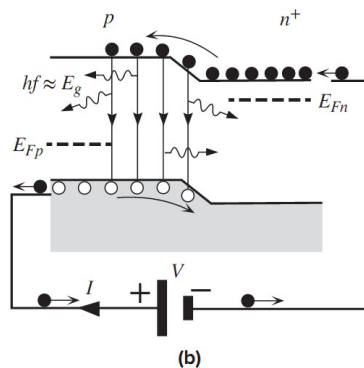
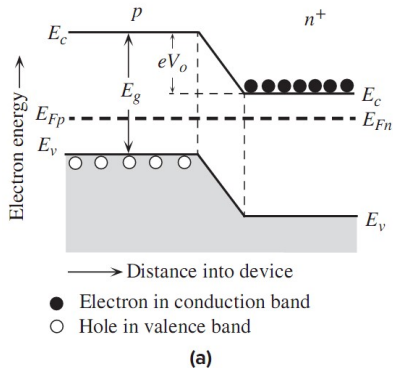
Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

Email: cuongnd@vnu.edu.vn

Ngày 15 tháng 11 năm 2021

1 CHƯƠNG 9. ĐI-ỐT PHÁT QUANG

Cấu tạo và nguyên tắc hoạt động của LED



- **Di-ốt phát quang (light emitting diode, LED)** là một di-ốt chuyển tiếp pn , thường được chế tạo từ một vật liệu bán dẫn vùng cấm thẳng (ví dụ GaAs), trong đó sự tái hợp của cặp điện tử-lỗ trống dẫn đến sự phát ra một photon. Năng lượng photon phát ra gần bằng năng lượng vùng cấm E_g .

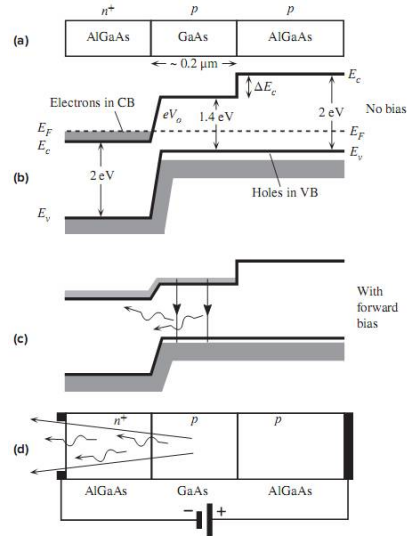
Cấu tạo và nguyên tắc hoạt động của LED

- Xét chuyển tiếp pn^+ . Khi không áp thế, hàng rào thế eV_0 ngăn cản sự khuếch tán của điện tử từ phía n^+ sang phía p .
- Khi áp thế thuận V , điện thế trong giảm từ V_0 xuống $V_0 - V$, cho phép điện tử khuếch tán (hoặc bị tiêm) từ phía n^+ vào phía p . Trong khi đó, sự khuếch tán của lỗ trống từ phía p sang phía n^+ là không đáng kể. Sự tái hợp của điện tử và lỗ trống tại vùng nghèo và ở phía p (trong khoảng độ dài khuếch tán của điện tử L_e) dẫn đến sự phát xạ photon. Hiện tượng phát quang thông qua sự tái hợp của cặp điện tử-lỗ trống do kết quả của sự tiêm hạt tải thiểu số được gọi là **điện phát quang bằng cơ chế tiêm hạt tải (injection electroluminescence)**.
- Quá trình tái hợp của cặp điện tử-lỗ trống là tự phát, vì vậy được gọi là **phát xạ photon tự phát (spontaneous photon emission)** và các photon phát ra có hướng ngẫu nhiên.
- Để photon phát ra có thể ra khỏi linh kiện mà không bị tái hấp thụ, lớp p cần mỏng hoặc cần sử dụng **linh kiện có cấu trúc dị chất (heterostructure)**.

- Chuyển tiếp pn giữa hai bán dẫn pha tạp từ cùng một loại vật liệu (cùng E_g) được gọi là **chuyển tiếp đồng chất (homojunction)**.
- Chuyển tiếp pn giữa hai bán dẫn có E_g khác nhau được gọi là **chuyển tiếp dị chất (heterojunction)**. Linh kiện tương ứng được gọi là **linh kiện có cấu trúc dị chất (heterostructure device)**.
- **Cấu trúc dị chất kép (double-heterostructure, DH)** thường được sử dụng để nâng cao cường độ ánh sáng phát ra.

LED dị chất cường độ cao

- (a) Một đi-ốt cấu trúc dị chất kép gồm 2 chuyển tiếp giữa 2 bán dẫn có độ rộng vùng cấm khác nhau (GaAs và AlGaAs).
- (b) Giải đồ vùng năng lượng đơn giản hóa, E_F cần phải đồng nhất trên toàn bộ linh kiện.
- (c) Giải đồ vùng năng lượng đơn giản hóa khi áp thế thuận.
- (d) Mô tả các photon có thể thoát ra khỏi linh kiện mà không bị hấp thụ bởi lớp AlGaAs.



Vật liệu và cấu trúc LED

- Để thu được hiệu suất phát sáng cao, cần sử dụng bán dẫn có vùng cấm thẳng.

Semiconductor Active Layer	Structure	D or I	λ (nm)	PCE (%)	Comment
GaAs	DH	D	870–900	10	Infrared (IR)
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 0.4$)	DH	D	640–870	3–20	Red to IR
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($y \approx 2.20x$, $0 < x < 0.47$)	DH	D	1–1.6 μm	>10	LEDs in communications
$\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{In}_{0.49}\text{P}$	DH	D	570–630	>10	Amber, green, red. High luminous intensity
InGaN/GaN	MQW	D	450–530	5–20	Blue–green
AlGaIn/GaN	MQW	D	240–360	1–30	UV
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y < 0.45$)	HJ	D	630–870	<1	Red–IR
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y > 0.45$) (N or Zn, O doping)	HJ	I	560–700	<1	Red, orange, yellow
SiC (doped)	HJ	I	460–470	0.02	Blue. Low efficiency
GaP (Zn–O)	HJ	I	700	<2	Red
GaP (N)	HJ	I	565	<1	Green

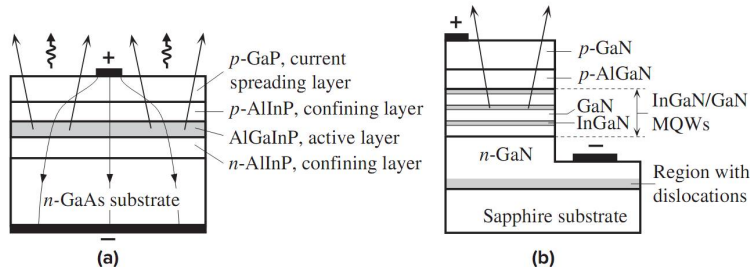
DH: double-heterostructure

MQW: multiple quantum well (đa giếng lượng tử)

D: direct bandgap

I: indirect bandgap

Vật liệu và cấu trúc LED



Mô tả 2 loại LED:

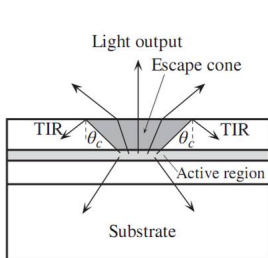
(a) LED cường độ cao dựa trên cấu trúc dị chất sử dụng AlGaInP.

- Để n-GaAs đóng vai trò giá đỡ cho toàn bộ cấu trúc pn .

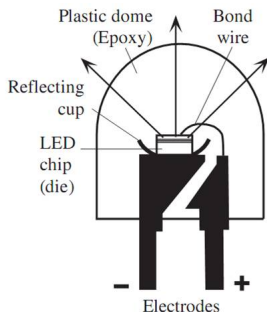
- Các lớp bên trên, tính từ n-AlInP (confining layer) cần được mọc một cách **Epitaxy**, nghĩa là có cùng cấu trúc tinh thể với đế để giảm thiểu sai lệch hằng số mạng \rightarrow giảm khuyết tật trong tinh thể (tâm tái hợp) \rightarrow tăng hiệu suất phát quang của LED.

(b) LED dựa trên đa giếng lượng tử gốc N (GaN/InGaN).

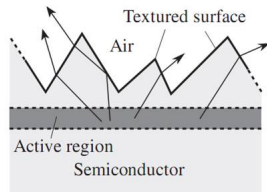
Vật liệu và cấu trúc LED



(a)



(b)



(c)

(a) Một phần ánh sáng sinh ra bên trong bị phản xạ toàn phần tại mặt tiếp xúc bán dẫn/dẫn/không khí và không thể phát xạ ra bên ngoài.

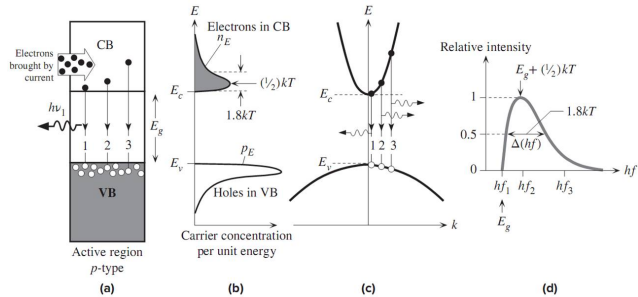
(b) Một cấu trúc đơn giản giải quyết được vấn đề phản xạ toàn phần bằng cách đặt chip LED tại tâm của 1 bán cầu bằng nhựa trong suốt.

(c) Một cấu trúc nhám cho phép ánh sáng thoát ra ngoài sau một (vài) lần phản xạ.

Phổ phát xạ của LED

- Năng lượng photon phát xạ từ một LED không đơn giản là bằng năng lượng vùng cấm E_g do cả điện tử trong vùng dẫn và lỗ trống trong vùng hóa trị đều có sự phân bố nhất định theo năng lượng. Xét một vùng hoạt động loại p và sự tiêm của điện tử dư vào trong lớp này dưới tác dụng của sự phân cực thuận. Nồng độ điện tử là $n_E(E) = g(E)f(E)$, với $g(E)$ là mật độ trạng thái, $f(E)$ là hàm phân bố Fermi-Dirac, và một cách gần đúng chúng ta sẽ sử dụng **hàm phân bố Boltzmann** cho $f(E)$. Do nồng độ lỗ trống là rất lớn, nên chúng ta có thể giả sử tốc độ tái hợp phụ thuộc chủ yếu vào nồng độ của điện tử tiêm vào, và xác suất của sự chuyển dời điện tử về trạng thái còn trống trong vùng hóa trị.
- Hàm phụ thuộc của nồng độ điện tử trong vùng dẫn vào năng lượng là bất đối xứng, có một đỉnh tại giá trị năng lượng $\frac{1}{2}k_B T$ cao hơn E_C , và có độ rộng tại nửa cực đại là $1.8k_B T$. Khi một điện tử tại mức E_C tái hợp với một lỗ trống tại mức E_V , tương ứng với chuyển dời số 1, sẽ phát ra một photon có năng lượng $hf_1 = E_C - E_V = E_g$. Do không có nhiều điện tử và lỗ trống tại mép của các vùng năng lượng, nên loại tái hợp này không xảy ra thường xuyên, do vậy cường độ ánh sáng phát ra theo chuyển dời số 1 là nhỏ.
- Các chuyển dời số 2 tương ứng với nồng độ điện tử lớn nhất, tức đỉnh của hàm $n_E(E)$, và phát ra photon với $hf_2 > hf_1$. Loại chuyển dời này có xác suất cao nhất nên cường độ ánh sáng phát ra là lớn nhất. Tương tự như chuyển dời số 1, chuyển dời số 3 với $hf_3 > hf_2$ thì ít thường xuyên hơn và có cường độ phát xạ nhỏ.

Phổ phát xạ của LED



(a) Giảm độ vùng năng lượng với các đường tái hợp khả dĩ.

(b) Sự phân bố theo mức năng lượng của điện tử ở vùng dẫn và lỗ trống ở vùng hóa trị. Mật độ điện tử cao nhất đạt được ở mức $(1/2)k_B T$ bên trên mức E_C

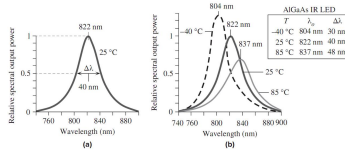
(c) Giảm đồ $E-k$ đơn giản hóa và các đường tái hợp trực tiếp trong đó k (tức động lượng $p = \hbar k$) được bảo toàn.

(d) Cường độ tương đối của ánh sáng phát ra dựa trên giản đồ (b) và (c).

Phổ phát xạ của LED

- Thoạt nhìn có thể thấy cường độ phát xạ lớn nhất tương ứng với sự chuyển dời từ đỉnh của n_E trong vùng dẫn xuống đỉnh của p_E trong vùng hóa trị, nghĩa là tương ứng với năng lượng photon $hf = E_g + k_B T$. Tuy nhiên điều này không xảy ra do các chuyển dời phải tuân theo định luật bảo toàn động lượng, được biểu diễn trên giản đồ $E-k$. Photon có động lượng không đáng kể, nghĩa là điện tử phải nhảy thẳng xuống trên giản đồ $E-k$ mà không thay đổi số sóng của nó, tức động lượng $\hbar k$ của điện tử được bảo toàn. Đường cong $E-k$ là có độ cong khác nhau trên vùng dẫn và vùng hóa trị, do vậy điện tử tại mức năng lượng $E_C + \frac{1}{2}k_B T$ không thể tái hợp với lỗ trống tại mức năng lượng $E_V - \frac{1}{2}k_B T$ do chuyển dời này không tuân theo định luật bảo toàn $\hbar k$. Sự tái hợp trực tiếp xảy ra đối với các điện tử có năng lượng trải rộng trên một vài $k_B T$ trong vùng dẫn, và mức độ mở rộng này là lớn hơn của lỗ trống trong vùng hóa trị, vì đường cong $E-k$ hẹp hơn trong vùng dẫn và rộng hơn trong vùng hóa trị. Rõ ràng là phổ phát xạ trong trường hợp này được xác định bởi n_E , do đó sự phát xạ có cực đại vào khoảng $E_g + \frac{1}{2}k_B T$. Hơn nữa, sự mở rộng của $\Delta(hf)$ theo năng lượng photon phát ra gần bằng với sự mở rộng của n_E , tức là $\Delta(hf) \approx 1.8k_B T$.

Phổ phát xạ của LED



- (a) Phổ phát xạ điển hình (sự phụ thuộc của cường độ bức xạ vào bước sóng) của một LED hồng ngoại sử dụng AlGaAs.
- (b) Phổ phát xạ của LED trên tại các nhiệt độ 25 °C, -40 °C và 85 °C.

- Độ rộng vùng cấm của vật liệu bán dẫn giảm khi nhiệt độ tăng, tuân theo phương trình Varshni:

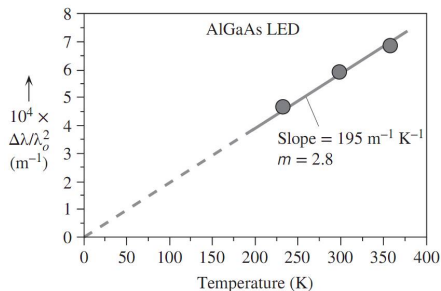
$$E_g = E_{g0} - \frac{AT^2}{B + T}$$

với E_{g0} là độ rộng vùng cấm tại $T = 0$ K, còn A và B là các hằng số đặc trưng cho vật liệu.

- Do vậy khi nhiệt độ tăng, bước sóng tại đỉnh phổ phát xạ λ_0 tăng theo phương trình:

$$hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = E_g + \frac{1}{2}k_B T, \text{ do sự giảm của } E_g \text{ mạnh hơn sự tăng của } \frac{1}{2}k_B T$$

Phổ phát xạ của LED



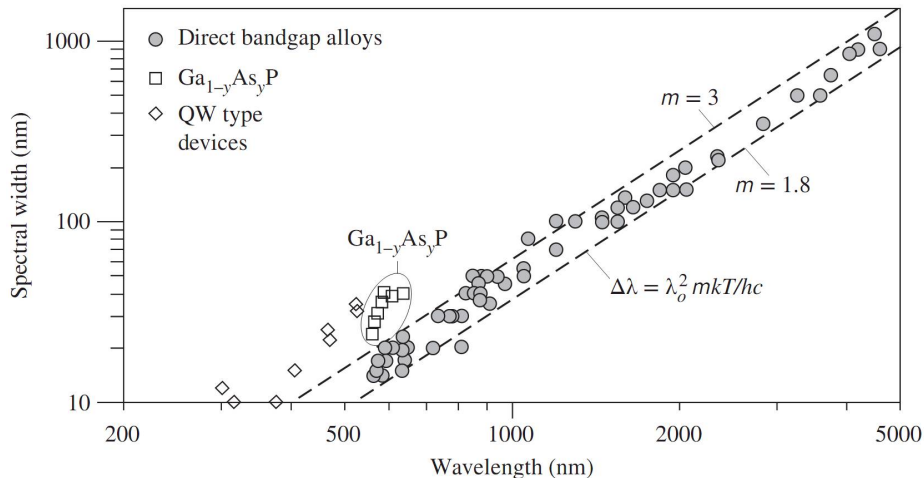
Sự phụ thuộc của $\Delta\lambda/\lambda_0^2$ vào nhiệt độ của một LED hồng ngoại AlGaAs.

- Độ rộng phổ (theo bước sóng) tại nửa cực đại (full width at half maximum, FWHM):

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 \frac{mk_B T}{hc}, \text{ với } m \text{ nằm trong khoảng từ 1.8 đến 3}$$

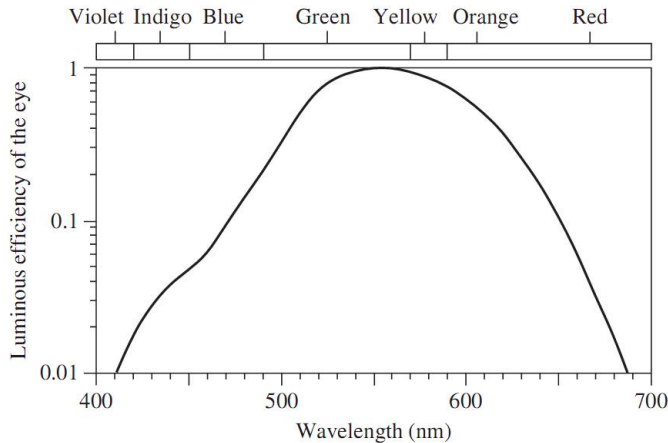
- Vì vậy, bước sóng tại đỉnh phổ λ_0 dịch về phía bước sóng dài, và độ rộng phổ $\Delta\lambda$ cũng tăng khi nhiệt độ tăng.

Phổ phát xạ của LED



Sự phụ thuộc của độ rộng phổ $\Delta\lambda$ vào đỉnh phát xạ λ_0 của các LED thương mại.

Độ sáng và hiệu suất phát sáng của LED



Hiệu suất chiếu sáng tương đối (relative luminous efficiency) η_{eye} , hay hàm khả kiến (visibility function) của mắt người.

Độ sáng và hiệu suất phát sáng của LED

- **Quang thông (luminous flux)**, đại lượng đặc trưng cho **độ sáng (brightness)**:

$$\Phi_v = P_0 \times (683 \text{ lm W}^{-1}) \times \eta_{\text{eye}}(\lambda), \text{ đơn vị là lumen (lm)}$$

với P_0 là công suất phát sáng của LED.

- **Hiệu suất phát sáng (Luminous Efficacy)** của một nguồn sáng:

$$\eta_{\text{LE}} = \frac{\Phi_v}{P_e} = \frac{\Phi_v}{IV} \text{ với } P_e = IV \text{ là công suất điện vào}$$

Đèn sợi đốt có η_{LE} là 17 lm/W, trong đó LED có η_{LE} vào khoảng 100 lm/W.

- **Hiệu suất chuyển đổi năng lượng (Power Conversion Efficiency, PCE)**, hay còn gọi là **hiệu suất ngoài (external efficiency)**:

$$\eta_{\text{PCE}} = \frac{\text{Công suất quang học ra}}{\text{Công suất điện vào}} = \frac{P_0}{IV}$$

Độ sáng và hiệu suất phát sáng của LED

- Sự tái hợp của điện tử và lỗ trống trong LED (cụ thể trong lớp p -GaAs) bao gồm tái hợp trực tiếp (có phát xạ, radiative) và tái hợp không trực tiếp (không phát xạ, nonradiative). Tái hợp không trực tiếp diễn ra thông qua các khuyết tật và tạp chất trong mạng tinh thể, và tạo thành dao động mạng (phonon). Gọi thời gian sống trung bình của điện tử trước tái hợp có phát xạ và không phát xạ là τ_r và τ_{nr} . **Hiệu suất lượng tử trong (Internal Quantum Efficiency, IQE)** là:

$$\eta_{IQE} = \frac{\text{Tốc độ tái hợp có phát xạ}}{\text{Tổng tốc độ tái hợp (có và không phát xạ)}} = \frac{\tau_r^{-1}}{\tau_r^{-1} + \tau_{nr}^{-1}}$$

Cường độ dòng cấp I tỉ lệ thuận với $(1/\tau_r + 1/\tau_{nr})$, trong khi đó tốc độ sinh photon ở trong linh kiện tỉ lệ thuận với $1/\tau_r$.

- Hiệu suất khai thác (Extraction Efficiency)** là:

$$\eta_{EE} = \frac{\text{Lượng photon ra khỏi linh kiện}}{\text{Lượng photon sinh ra bên trong linh kiện do tái hợp}}$$

Độ sáng và hiệu suất phát sáng của LED

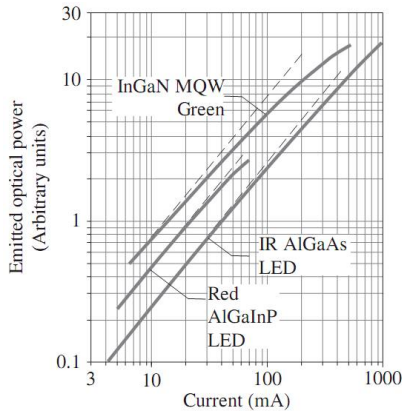
- Tốc độ điện tử được tiêm vào lớp p -GaAs là I/e , tốc độ sinh photon bên trong linh kiện là $\eta_{IQE}(I/e)$. Thông lượng photon thoát ra khỏi linh kiện là $\eta_{EE}\eta_{IQE}(I/e)$. Công suất quang học ra là:

$$P_0 = hf \times \text{Thông lượng photon} = hf\eta_{EE}\eta_{IQE}(I/e)$$

- Khi coi LED là một linh kiện biến đổi lượng tử điện tích (điện tử) thành lượng tử năng lượng phát xạ (photon), thì hiệu suất của sự biến đổi đó được gọi là **Hiệu suất lượng tử ngoài (External Quantum Efficiency, EQE)**:

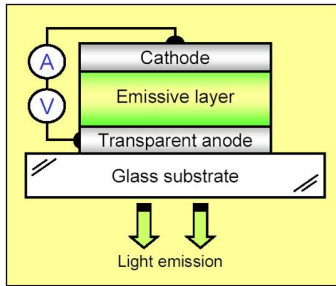
$$\eta_{EQE} = \frac{\text{Lượng photon phát xạ ra ngoài trong một giây}}{\text{Lượng điện tử chạy vào linh kiện trong một giây}} = \frac{P_0/hf}{I/e}$$

Độ sáng và hiệu suất phát sáng của LED

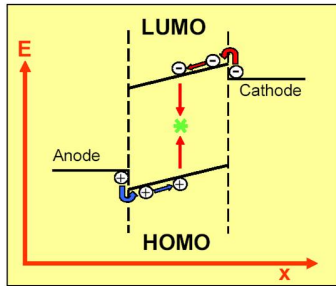


Sự phụ thuộc của công suất phát sáng (P_0) vào cường độ dòng nuôi (I) của 3 LED thương mại phát sáng tại vùng hồng ngoại, đỏ và xanh lục. Hàm tuyến tính lý tưởng $P_0 \propto I$ được mô tả bằng đường đứt nét.

Đi-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



Device structure



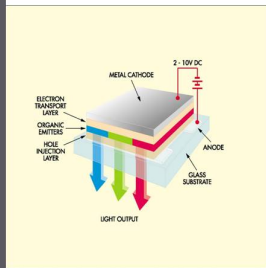
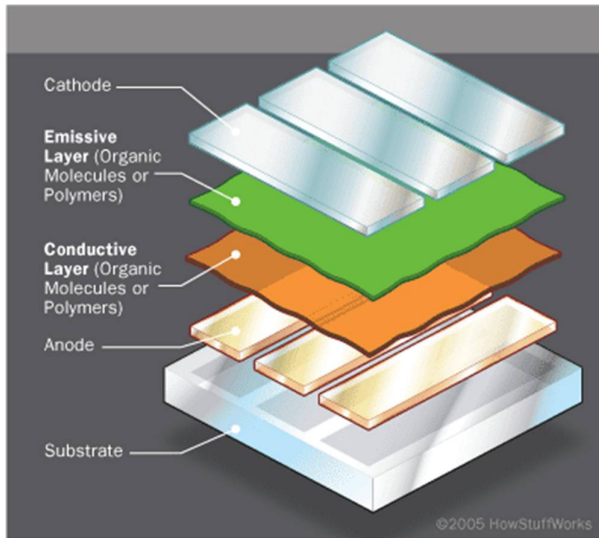
Device energy diagram

Cấu trúc của OLED (Organic LED).

HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital (Orbital phân tử điện đầy cao nhất), tương tự như E_V trong bán dẫn vô cơ.

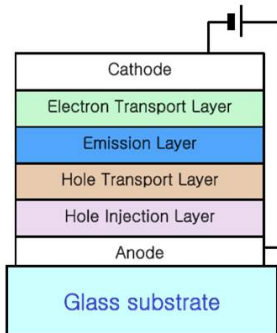
LUMO: Lowest Unoccupied Molecular Orbital (Orbital phân tử không điện đầy thấp nhất), tương tự như E_C trong bán dẫn vô cơ.

Đi-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



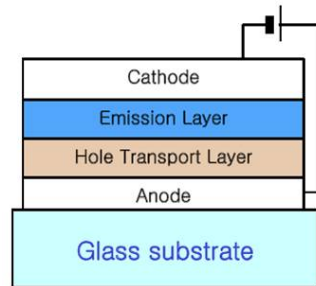
Di-ốt phát quang hữu cơ (OLED)

Small Molecule
Fluorescence OLED



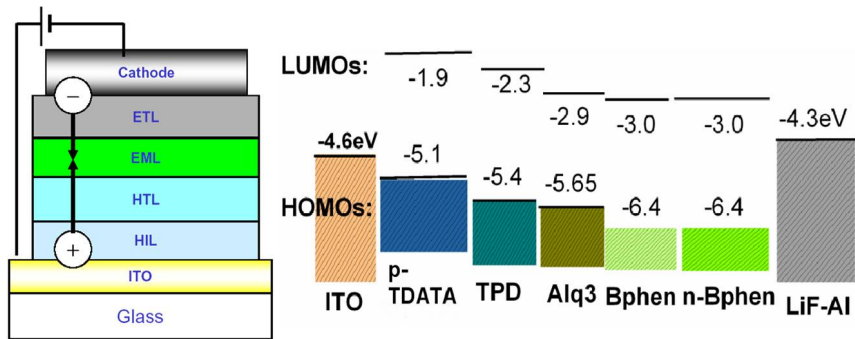
OLED chế tạo từ vật liệu hữu cơ phân tử nhỏ.

Polymer OLED
(PLED)



OLED chế tạo từ vật liệu hữu cơ polymer.

Di-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



Vật liệu hữu cơ phân tử nhỏ dùng trong OLED.

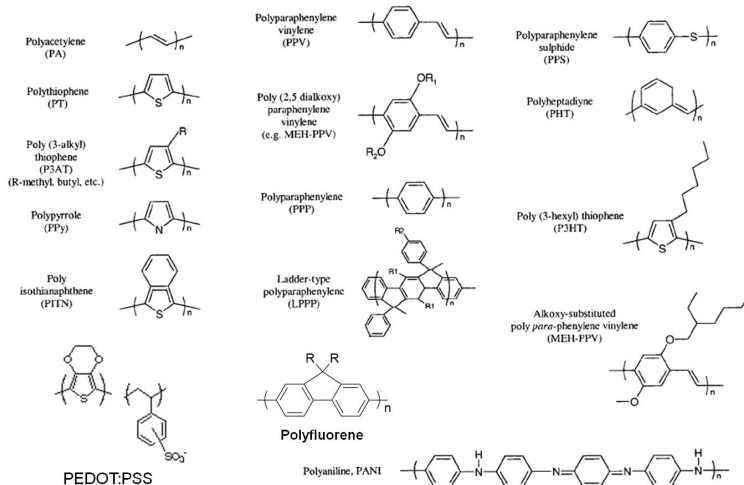
HIL: lớp tiêm lỗ trống.

HTL: lớp truyền lỗ trống.

EML: lớp phát quang.

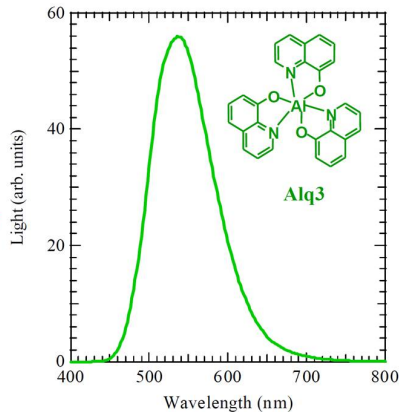
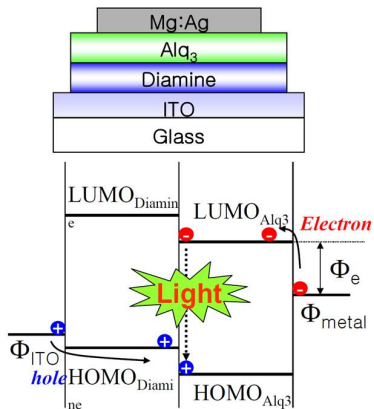
ETL: lớp truyền điện tử.

Di-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



Vật liệu hữu cơ polymer dẫn.

Đi-ốt phát quang hữu cơ (OLED)

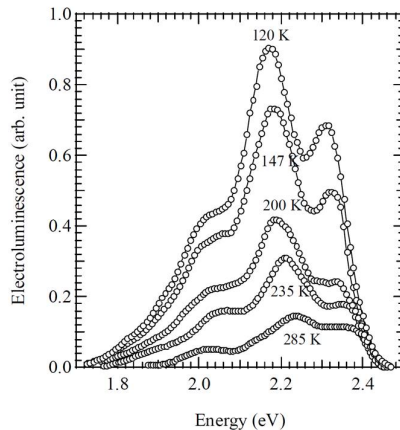
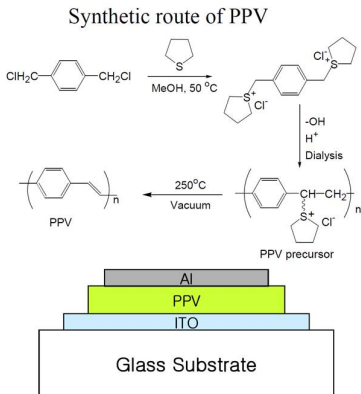


- High efficiency: 1 % quantum efficiency (electron/photon), 1.5 lm/W luminous efficiency
- Low driving voltage: more than 1000 cd/m² below 10 V

C. W. Tang and S. A. VanSlyke, Appl. Phys. Lett. **51**, 913 (1987)

OLED đầu tiên sử dụng phân tử nhỏ.

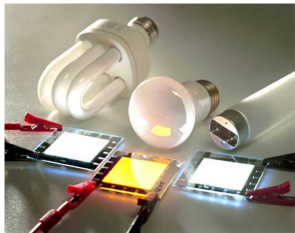
Di-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



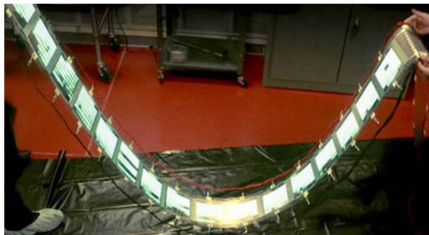
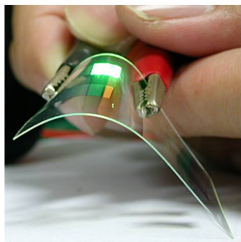
J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns, and A. B. Holmes, *Nature* **347**, 539 (1990).

OLED đầu tiên sử dụng polymer.

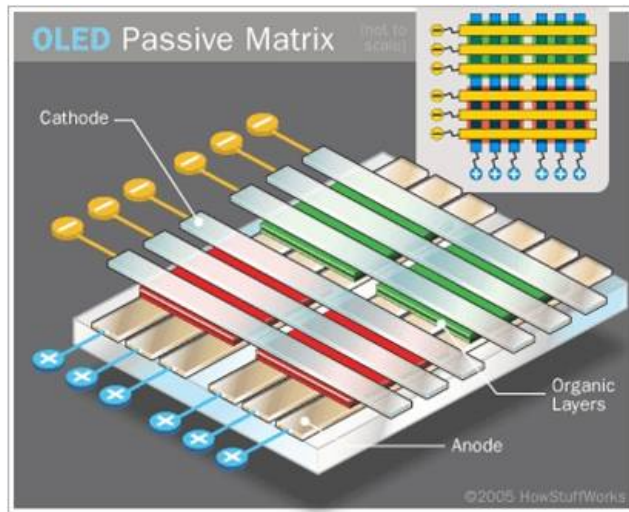
Đi-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



3mm thickness (Sony)

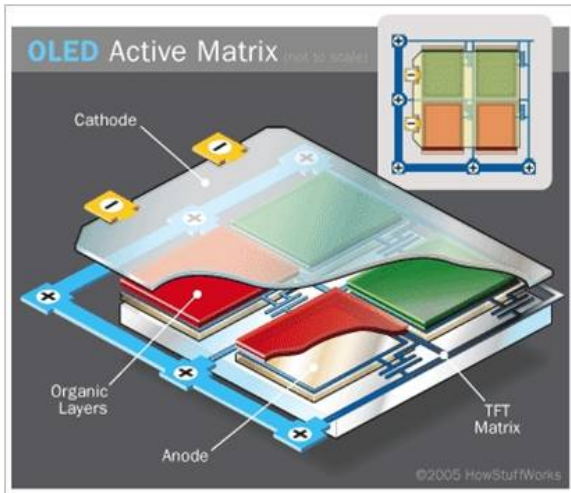


Đi-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



OLED ma trận bị động (PMOLED).

Đi-ốt phát quang hữu cơ (OLED)



OLED ma trận chủ động (AMOLED).

Di-ốt phát quang hữu cơ (OLED)

	CRT	PDP	LCD	OLED
Large Size	▲	⊙	●	●
High Resolution	●	●	⊙	⊙
Thickness/Weight	×	▲	⊙	⊙
Response Time	●	●	×	⊙
Viewing Angle	⊙	⊙	×	⊙
Cost	⊙	×	▲	●
Color	⊙	●	▲	⊙
Power Consumption	×	×	●	⊙
Image Sticking	⊙	●	⊙	●

OLED

=

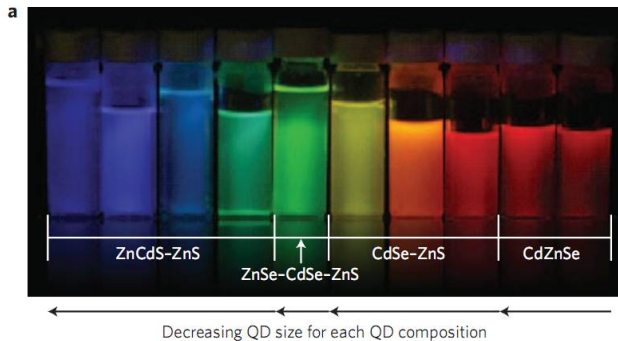
CRT: Cost, Color, Viewing angle, Response time

+

LCD: Thickness & Weight, Power Consumption

So sánh các loại màn hình hiển thị.

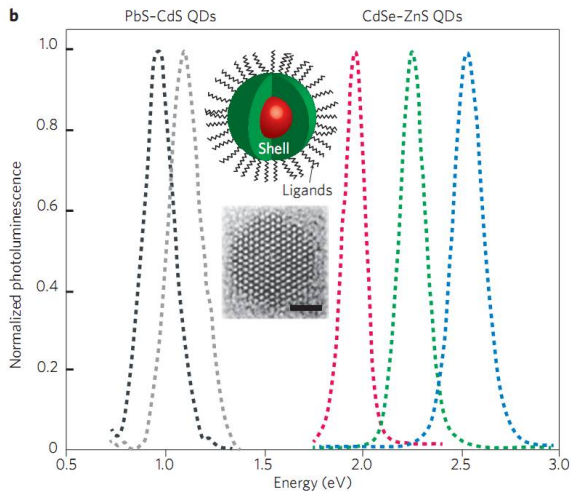
Đi-ốt phát quang sử dụng chấm lượng tử (QD-LED)



- Chấm lượng tử (Quantum dot, QD): vật liệu bán dẫn có cấu trúc nano (thường dạng hạt). E_g của QD lớn hơn của vật liệu khối và càng lớn khi kích thước của nó càng nhỏ (cỡ vài nm).

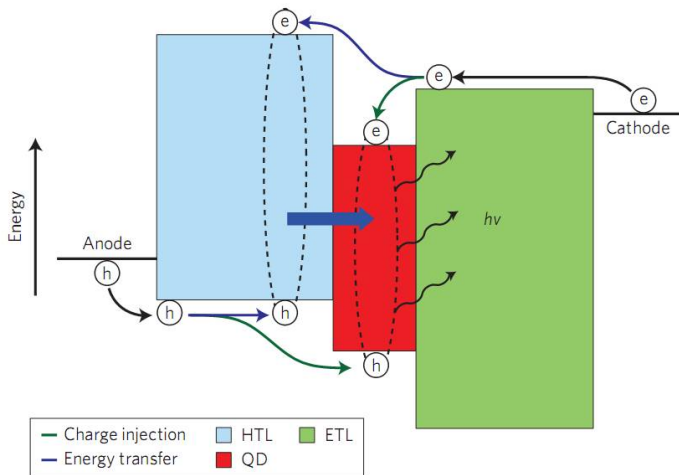
Tham khảo: Emergence of colloidal quantum-dot light-emitting technologies (DOI: 10.1038/nphoton.2013.328).

Đi-ốt phát quang sử dụng chấm lượng tử (QD-LED)



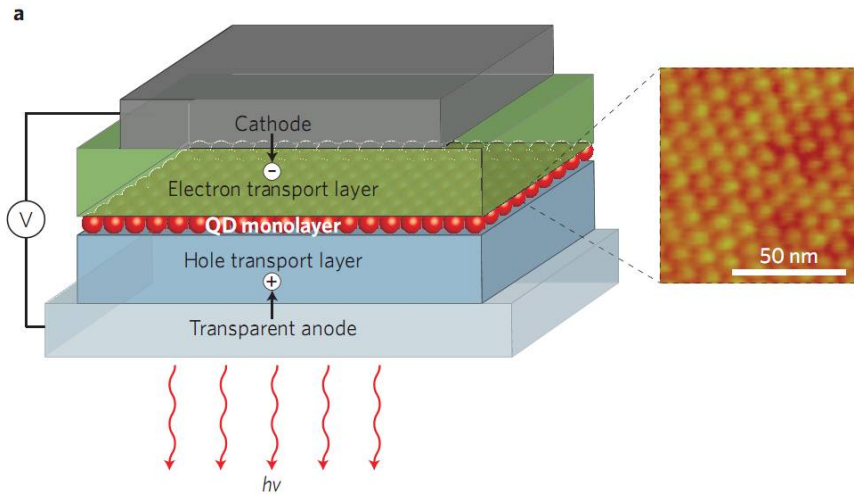
Phổ quang-phát quang (PL) của chấm lượng tử.

Đi-ốt phát quang sử dụng chấm lượng tử (QD-LED)



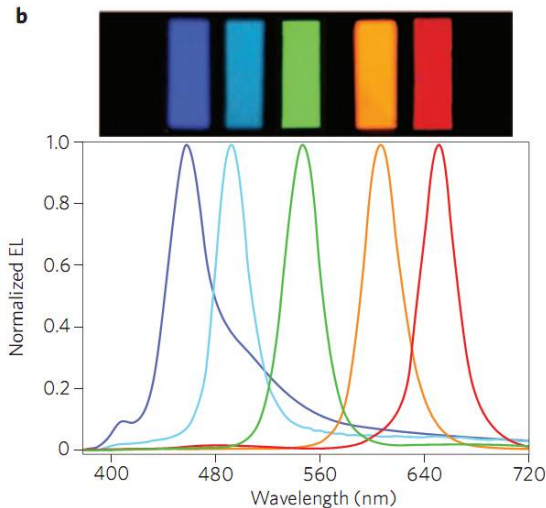
Cấu trúc vùng năng lượng của QD-LED.

Đi-ốt phát quang sử dụng chấm lượng tử (QD-LED)



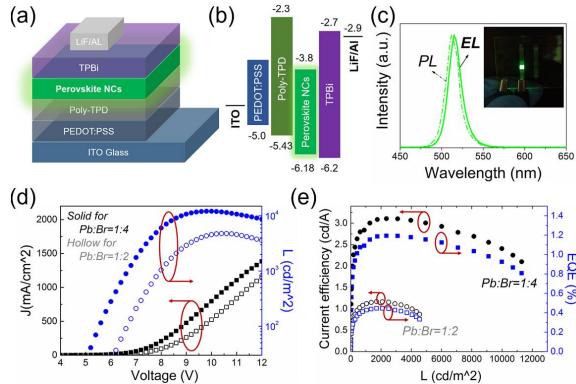
Cấu trúc hình học của QD-LED.

Đi-ốt phát quang sử dụng chấm lượng tử (QD-LED)



Phổ điện-phát quang (EL) của QD-LED.

Di-ốt phát quang sử dụng chấm lượng tử (QD-LED)



Cấu trúc, giản đồ năng lượng vùng phẳng, phổ PL, EL, đặc trưng J - V , L - V , hiệu suất dòng điện (CE) và hiệu suất chuyển đổi năng lượng (EQE) của CsPbBr₃ QD-LED.

Tham khảo: Halide-Rich Synthesized Cesium Lead Bromide Perovskite Nanocrystals for Light-Emitting Diodes with Improved Performance (DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b00692).

The End