

ĐHBK Tp HCM-Khoa Đ-ĐT
BMĐT
GVPT: Hồ Trung Mỹ
Môn học: Dụng cụ bán dẫn

Chương 4

Chuyển tiếp PN

(PN Junction)

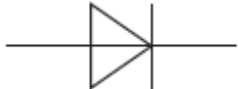
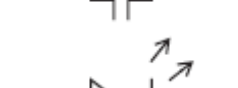
Nội dung chương 4

1. Chuyển tiếp PN – Giới thiệu các khái niệm
2. Điều kiện cân bằng nhiệt
3. Miền nghèo
4. Điện dung miền nghèo
5. Đặc tuyến dòng-áp
6. Các mô hình của diode bán dẫn
7. Điện tích chứa và quá trình quá độ
8. Đánh thủng chuyển tiếp
9. Chuyển tiếp dị thể (Heterojunction)
10. Các loại diode bán dẫn khác
11. Giới thiệu các ứng dụng của diode bán dẫn

4.10 Các diode bán dẫn khác

- Diode chỉnh lưu (rectifier)
- Diode ổn áp
- Diode biến dung
- Diode phát quang (LED)
- Diode quang (Photodiode=PD)
- Diode Schottky
- Diode Tunnel (đường hầm)
- . . .

Các ký hiệu diode

preferred	other		
		ordinary diode	(diode thường)
		zener (unidirectional breakdown)	(diode ổn áp)
		Schottky	(diode Schottky)
		bidirectional breakdown	(diode đánh thủng 2 chiều)
		varicap	(diode biến dung = varactor)
		light emitting diode	(diode phát quang)

4.10.1 Diode chỉnh lưu (Rectifier)

- Diode chỉnh lưu là dụng cụ 2 cực cho điện trở rất thấp với dòng điện theo 1 chiều và điện trở rất cao ở chiều ngược lại. nghĩa là cho chỉ 1 cho phép dòng điện chạy theo 1 chiều (đặc tính chỉnh lưu).
- Điện trở thuận và ngược của diode chỉnh lưu có thể được suy từ quan hệ dòng-áp của diode thật:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

- Với I_0 là dòng bão hòa ngược và η là hệ số lý tưởng, tổng quát có giá trị từ 1 (với dòng khuếch tán) đến 2 (với dòng tái hợp)

Điện trở thuận và ngược

- Điện trở thuận DC (hay tĩnh) R_F và điện trở tín hiệu nhỏ (hay động) r_F :

$$R_F \equiv \frac{V_F}{I_F} \approx \frac{V_F}{I_0} \exp\left(\frac{-qV_F}{\eta kT}\right),$$

$$r_F \equiv \frac{dV_F}{dI_F} \approx \frac{\eta kT}{qI_F}.$$

- Điện trở ngược DC R_R và điện trở ngược tín hiệu nhỏ r_R :

$$R_R \equiv \frac{V_R}{I_R} \approx \frac{V_R}{I_0},$$

$$r_R \equiv \frac{dV_R}{dI_R} = \frac{\eta kT}{qI_0} \exp\left(\frac{q|V_R|}{\eta kT}\right)$$

- Các diode PN chỉnh lưu về tổng quát có tốc độ chuyển mạch chậm; nghĩa là nó cần thời gian trì hoãn để có được tổng trở cao sau khi chuyển mạch từ trạng thái dẫn thuận sang trạng thái tắt. Trì hoãn này tỉ lệ với thời gian sống của hạt dẫn thiểu số, với tần số thấp thì nó không ảnh hưởng nhiều. Tuy nhiên ở những ứng dụng tần số cao nó ảnh hưởng đến hiệu suất chỉnh lưu.
- Phần lớn các diode chỉnh lưu có tiêu tán công suất từ 0.1W đến 10W, điện áp đánh thủng từ 50 đến 2500V (với các diode chỉnh lưu cao áp, người ta mắc nối tiếp từ 2 chuyển tiếp P-N trở lên), và thời gian chuyển mạch từ 50ns (với diode công suất thấp) đến khoảng 500ns (với diode công suất cao) .
- Diode chỉnh lưu có nhiều ứng dụng:
 - Biến đổi tín hiệu AC thành dạng sóng đặc biệt. TD: chỉnh lưu bán kỳ, toàn sóng, mạch xén, mạch kẹp, mạch tách sóng đỉnh (giải điều chế).
 - Mạch bảo vệ tĩnh điện
 - Khóa điện tử . . .

Diode specification sheets

Data about a diode is presented uniformly for many different diodes. This makes cross-matching of diodes for replacement or design easier.

1. V_F , forward voltage at a specific current and temperature
2. I_F , maximum forward current at a specific temperature
3. I_R , maximum reverse current at a specific temperature
4. PIV or PRV or V_{BR} , maximum reverse voltage at a specific temperature
5. Power Dissipation, maximum power dissipated at a specific temperature
6. C, Capacitance levels in reverse bias
7. t_{rr} , reverse recovery time
8. Temperatures, operating and storage temperature ranges

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

FEATURES

- Hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) package
- High switching speed: max. 4 ns
- General application
- Continuous reverse voltage: max. 75 V
- Repetitive peak reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak forward current: max. 450 mA.

APPLICATIONS

- High-speed switching.

DESCRIPTION

The 1N4148 and 1N4448 are high-speed switching diodes fabricated in planar technology, and encapsulated in hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) packages.



The diodes are type branded.

Fig.1 Simplified outline (SOD27; DO-35) and symbol.

1N4148

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{RRM}	repetitive peak reverse voltage		–	100	V
V_R	continuous reverse voltage		–	75	V
I_F	continuous forward current	see Fig.2; note 1	–	200	mA
I_{FRM}	repetitive peak forward current		–	450	mA
I_{FSM}	non-repetitive peak forward current	square wave; $T_j = 25\text{ °C}$ prior to surge; see Fig.4			
		$t = 1\text{ }\mu\text{s}$	–	4	A
		$t = 1\text{ ms}$	–	1	A
		$t = 1\text{ s}$	–	0.5	A
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} = 25\text{ °C}$; note 1	–	500	mW
T_{stg}	storage temperature		–65	+200	°C
T_j	junction temperature		–	200	°C

Note

1. Device mounted on an FR4 printed circuit-board; lead length 10 mm.

1N4148

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage	see Fig.3			
	1N4148	$I_F = 10\text{ mA}$	–	1	V
	1N4448	$I_F = 5\text{ mA}$	0.62	0.72	V
		$I_F = 100\text{ mA}$	–	1	V
I_R	reverse current	$V_R = 20\text{ V}$; see Fig.5		25	nA
		$V_R = 20\text{ V}$; $T_j = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; see Fig.5	–	50	μA
I_R	reverse current; 1N4448	$V_R = 20\text{ V}$; $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; see Fig.5	–	3	μA
C_d	diode capacitance	$f = 1\text{ MHz}$; $V_R = 0$; see Fig.6	–	4	pF
t_{rr}	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\text{ mA}$ to $I_R = 60\text{ mA}$; $R_L = 100\text{ }\Omega$; measured at $I_R = 1\text{ mA}$; see Fig.7	–	4	ns
V_{fr}	forward recovery voltage	when switched from $I_F = 50\text{ mA}$; $t_r = 20\text{ ns}$; see Fig.8	–	2.5	V

THERMAL CHARACTERISTICS

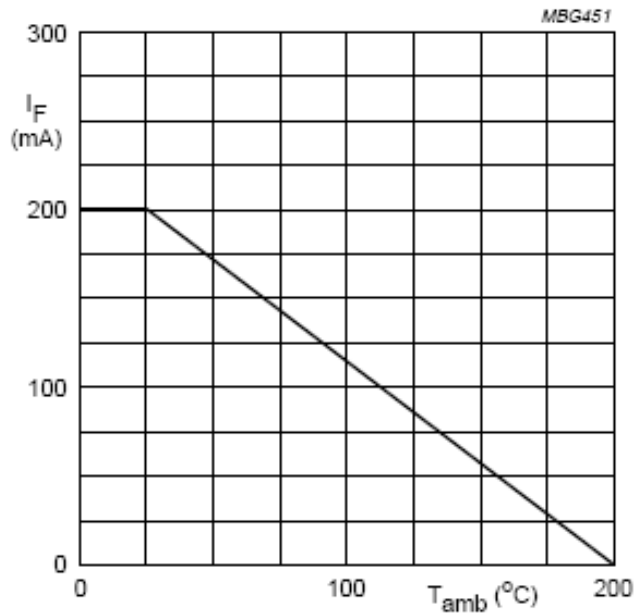
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-tp}$	thermal resistance from junction to tie-point	lead length 10 mm	240	K/W
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	lead length 10 mm; note 1	350	K/W

Note

1. Device mounted on a printed circuit-board without metallization pad.

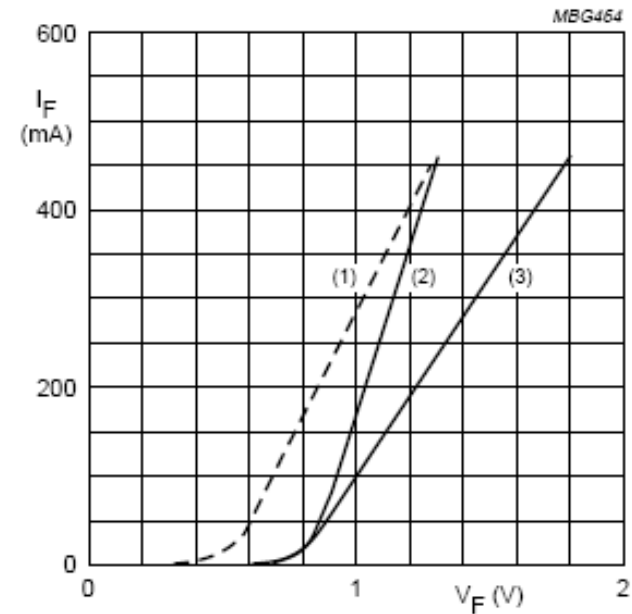
1N4148

GRAPHICAL DATA



Device mounted on an FR4 printed-circuit board; lead length 10 mm.

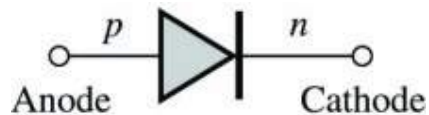
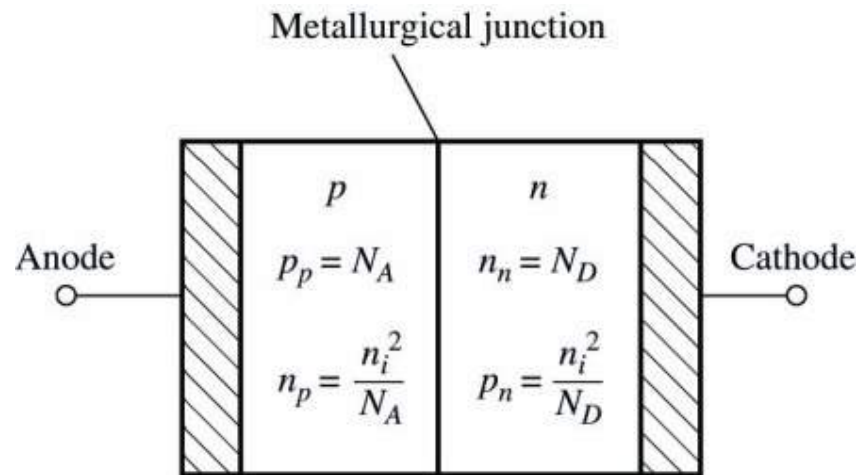
Fig.2 Maximum permissible continuous forward current as a function of ambient temperature.



- (1) $T_J = 175^{\circ}\text{C}$; typical values.
- (2) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$; typical values.
- (3) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$; maximum values.

Fig.3 Forward current as a function of forward voltage.

Diode



Diode symbol

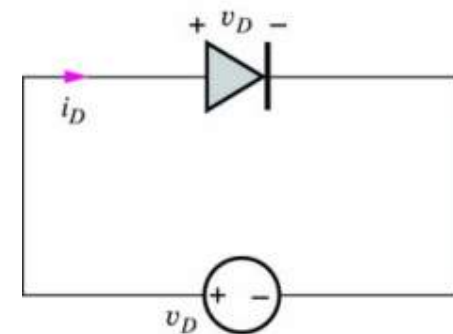
- A diode is formed by joining an n -type semiconductor with a p -type semiconductor.
- A **pn junction** is the interface between n and p regions.

Phương trình diode

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{qv_D}{nkT}\right) - 1 \right] = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right]$$

với

- I_S = dòng bão hòa ngược (A)
- v_D = điện áp đặt trên diode (V)
- q = điện tích điện tử (1.60×10^{-19} C)
- k = hằng số Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)
- T = nhiệt độ tuyệt đối Kelvin
- n = hệ số không lý tưởng
- V_T = kT/q = điện áp nhiệt (V) (25 mV nhiệt độ phòng [$T=300\text{K}$])



I_S có trị tiêu biểu trong tầm từ 10^{-18} đến 10^{-9} A, và phụ thuộc nhiều nhiệt độ do nó phụ thuộc vào n_i^2 . Hệ số không lý tưởng có trị tiêu biểu gần 1, nhưng gần với 2 với dụng có mật độ dòng cao.

Dòng diode với các cách phân cực

- Phân cực ngược:

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right] \cong I_S [0 - 1] \cong -I_S$$

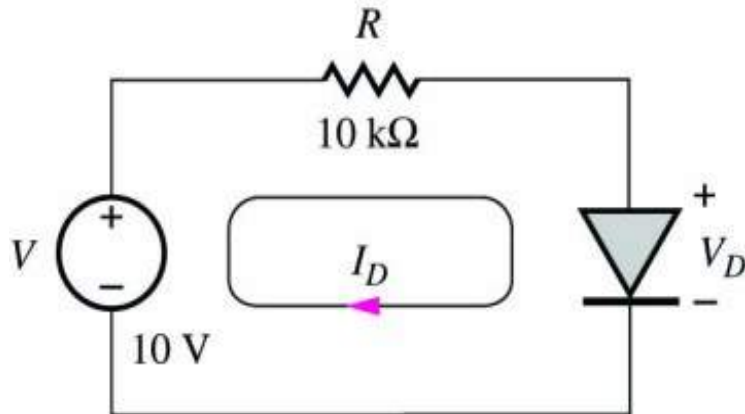
- Phân cực Zero: (không phân cực)

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right] \cong I_S [1 - 1] \cong 0$$

- Phân cực thuận:

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right] \cong I_S \exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right)$$

Giải tích mạch diode: Cơ sở



V và R có thể biểu diễn tương đương Thévenin của 1 mạng 2 cực phức tạp hơn. Đối tượng của giải tích mạch diode là tìm **điểm [làm việc] tĩnh (quiescent operating point) Q** của diode, nghĩa dòng và áp DC ở diode.

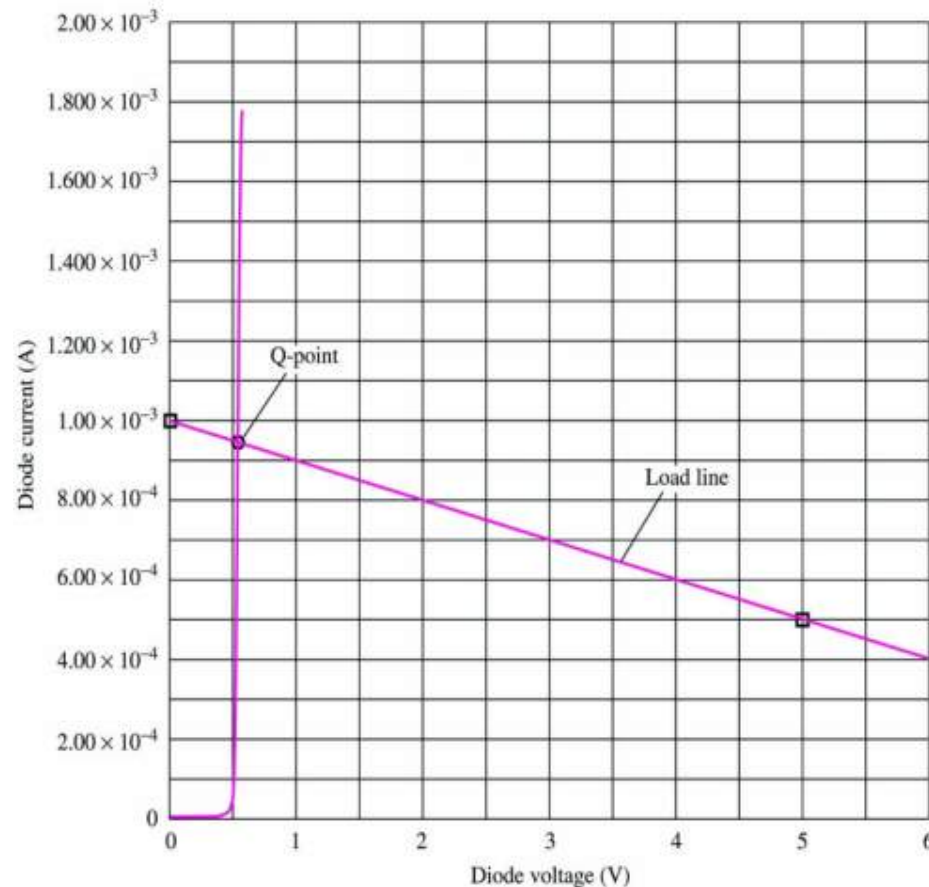
Phương trình vòng của mạch bên:

$$V = I_D R + V_D$$

Nó cũng được gọi là đường tải (**load line**) của diode (DCLL=DC Load Line). Nghiệm của phương trình này có thể tìm bằng:

- Giải tích đồ thị dùng phương pháp đường tải.
- Giải tích với mô hình toán của diode.
- Giải tích đơn giản hóa với mô hình diode lý tưởng.
- Giải tích đơn giản hóa với mô hình sụt áp hằng.

Giải tích đường tải (thí dụ)



Vấn đề: Tìm điểm Q

Cho trước: $V=10$ V, $R=10\text{k}\Omega$.

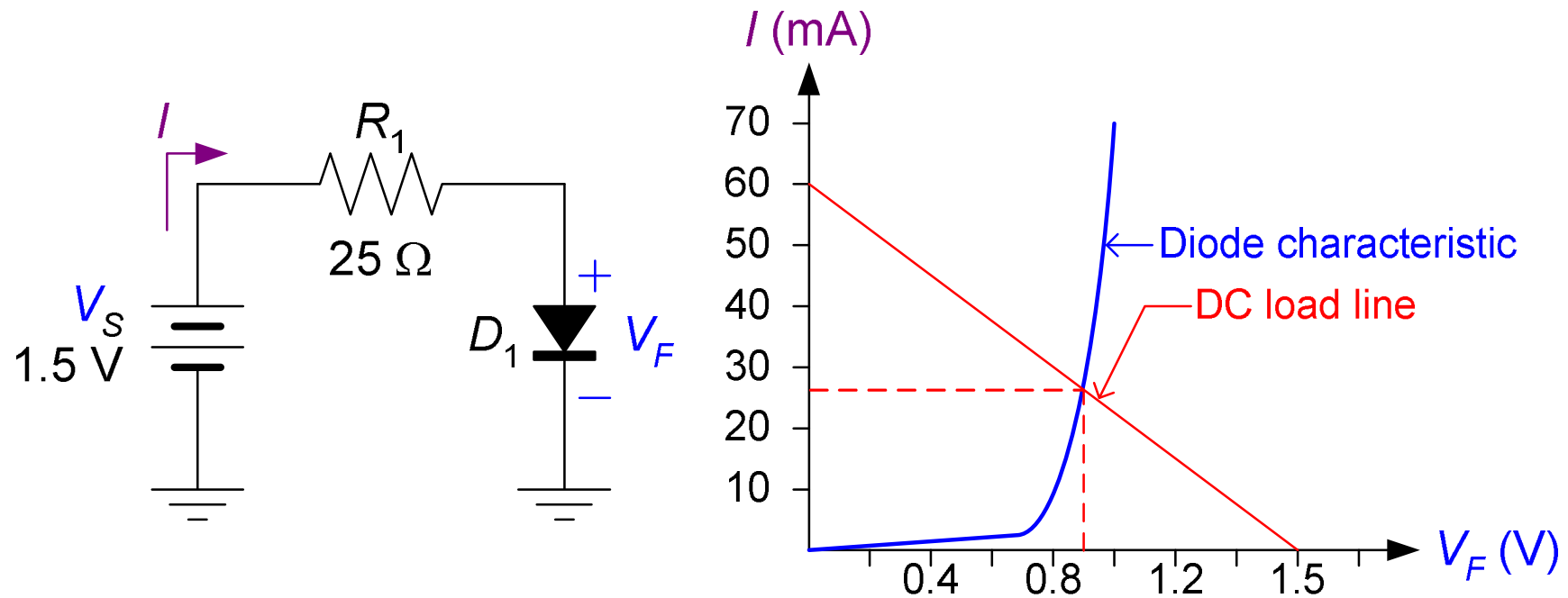
Giải tích: $10 = I_D 10^4 + V_D$

Để định nghĩa đường tải, ta dùng,
 $V_D = 0$ $I_D = (10\text{V} / 10\text{k}\Omega) = 1\text{mA}$
 $V_D = 5$ V, $I_D = 0.5$ mA

Giao của 2 đường này cho nghiệm:

Điểm Q = (0.95 mA, 0.6 V)

Đường tải DC (DC Load Line)



Phương trình đường tải:

$$I = \frac{V_S - V_F}{R_1} = \frac{1.5\text{V} - V_F}{25\Omega}$$

Giải tích dùng mô hình toán cho Diode

Vấn đề: Tìm điểm Q với đặc tuyến diode cho trước.

Dữ liệu: $I_S = 10^{-13}$ A, $n = 1$, $V_T = 0.025$ V

Giải tích:

$$10 = I_D 10^4 + V_D$$

$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right) - 1 \right] = 10^{-13} [\exp(40V_D) - 1]$$

$$\therefore 10 = 10^4 10^{-13} [\exp(40V_D) - 1] + V_D$$

Muốn giải hệ này ta phải dùng phương pháp tính số.

Bằng cách đoán các giá trị lặp lại cho V_D và tăng hay giảm V_D cho đến khi vế phải của phương trình bằng 10:

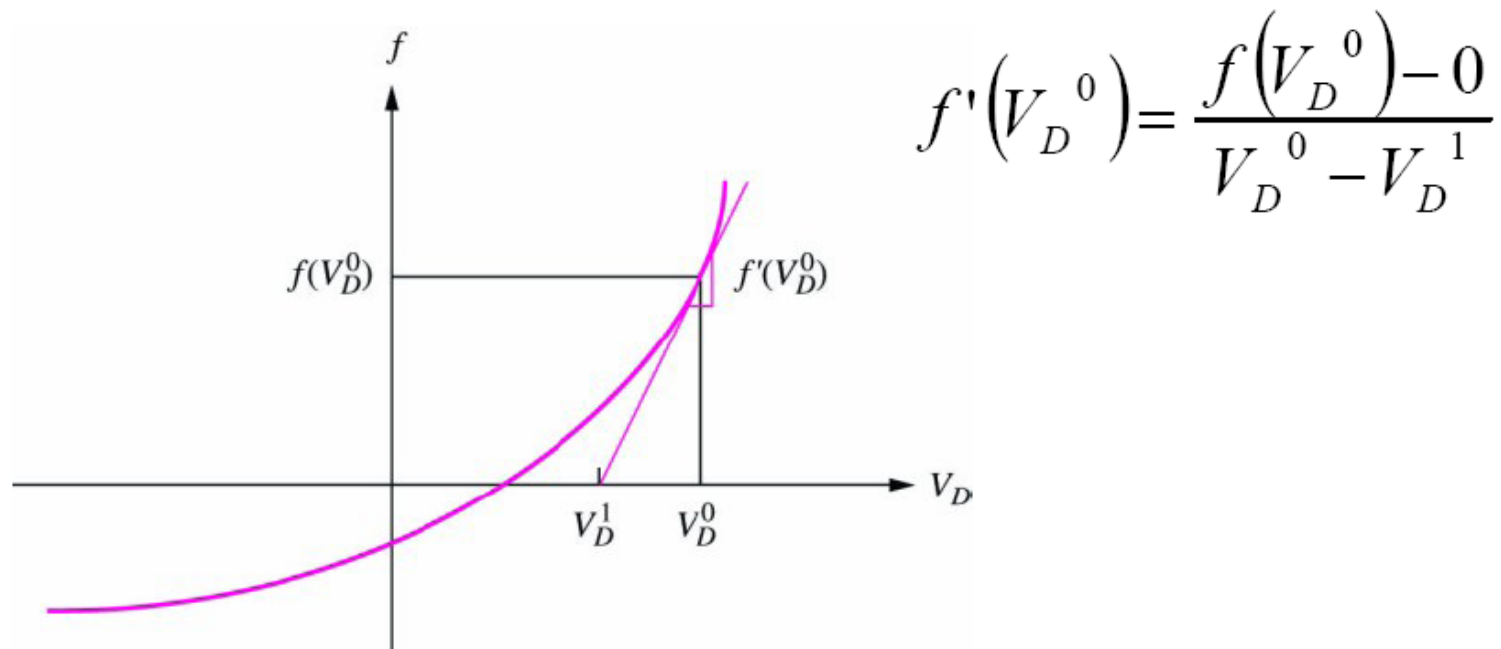
Điểm Q = (0.943 mA, 0.574 V)

thường thì 2 hay 3 số có nghĩa cho V_D vì I_S , n , V_T , và R hiếm khi có độ chính xác tốt hơn.

Ta sẽ SPICE nếu ta muốn dùng mô hình toán đầy đủ.

Newton's Iteration Method for $f(v_D) = 0$

1. Make initial guess V_D^0
2. Evaluate f and its derivative f' for this value of V_D
3. Calculate new guess for V_D using
$$V_D^1 = V_D^0 - \frac{f(V_D^0)}{f'(V_D^0)}$$
4. Repeat steps 2 and 3 till convergence



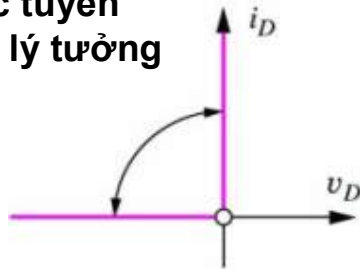
Solution from a Spreadsheet

Iteration #	V_D [V]	f	f'	I_D [A]
0	0.8000	-7.895E+04	-3.159E+06	7.896E+00
1	0.7750	-2.904E+04	-1.162E+06	2.905E+00
2	0.7500	-1.068E+04	-4.276E+05	1.069E+00
3	0.7250	-3.927E+03	-1.575E+05	3.936E-01
4	0.7001	-1.442E+03	-5.806E+04	1.452E-01
5	0.6753	-5.281E+02	-2.150E+04	5.374E-02
6	0.6507	-1.918E+02	-8.048E+03	2.012E-02
7	0.6269	-6.817E+01	-3.103E+03	7.754E-03
8	0.6049	-2.281E+01	-1.289E+03	3.220E-03
9	0.5872	-6.455E+00	-6.357E+02	1.587E-03
10	0.5770	-1.148E+00	-4.238E+02	1.057E-03
11	0.5743	-5.989E-02	-3.804E+02	9.486E-04
12	0.5742	-1.876E-04	-3.780E+02	9.426E-04
13	0.5742	-1.858E-09	-3.780E+02	9.426E-04

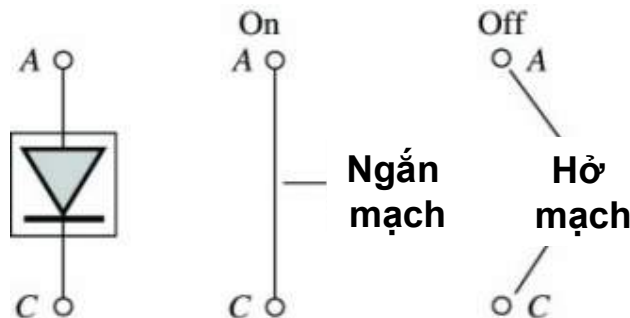
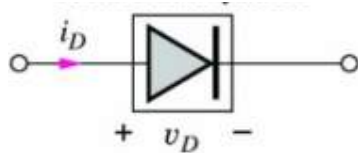
← Q-point

Giải tích dùng mô hình diode lý tưởng

Đặc tuyến diode lý tưởng



Ký hiệu diode lý tưởng



Nếu diode được phân cực thuận, sụt áp trên diode là zero. Nếu diode được phân cực ngược, dòng qua diode là zero.

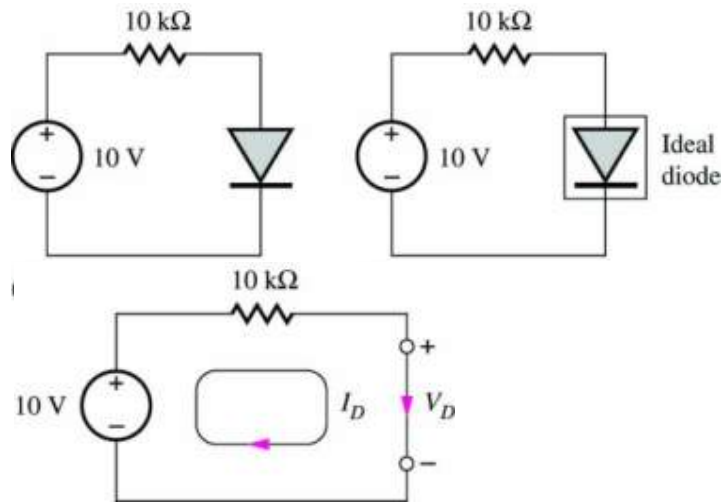
$v_D = 0$ với $i_D > 0$ và $i_D = 0$ với $v_D < 0$

Như vậy diode được giả sử là dẫn (ON) hay tắt (OFF).

Giải tích mạch diode theo các bước sau:

- Đoán miền hoạt động của diode từ mạch.
- Giải tích mạch dùng mô hình diode thích hợp với miền hoạt động được giả sử.
- Kiểm tra xem kết quả tính có nhất quán với giả thiết hay không.

Giải tích dùng mô hình diode lý tưởng (thí dụ)



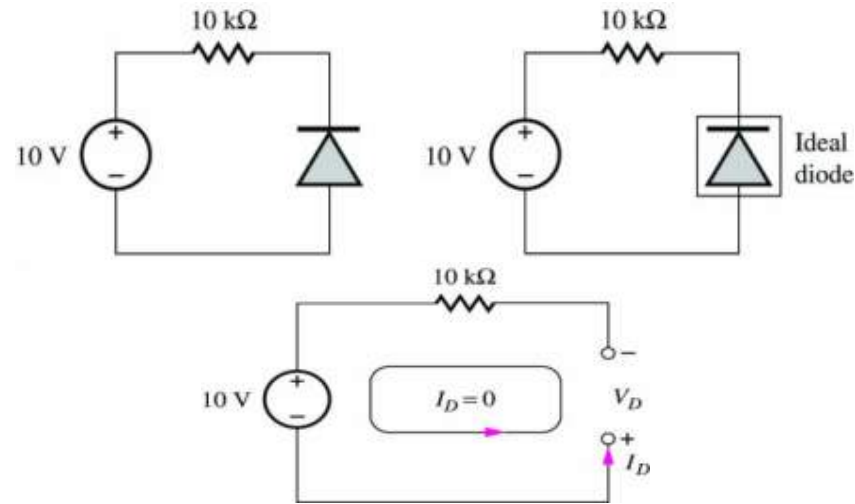
Giả sử diode ON (vì nó giống như Anode có điện thế cao hơn Cathode).

$$I_D = \frac{(10 - 0)V}{10k\Omega} = 1mA$$

$$I_D \geq 0$$

(giả thiết đúng)

Điểm Q là (1 mA, 0V)



Giả sử diode OFF. Từ đó $I_D = 0$.

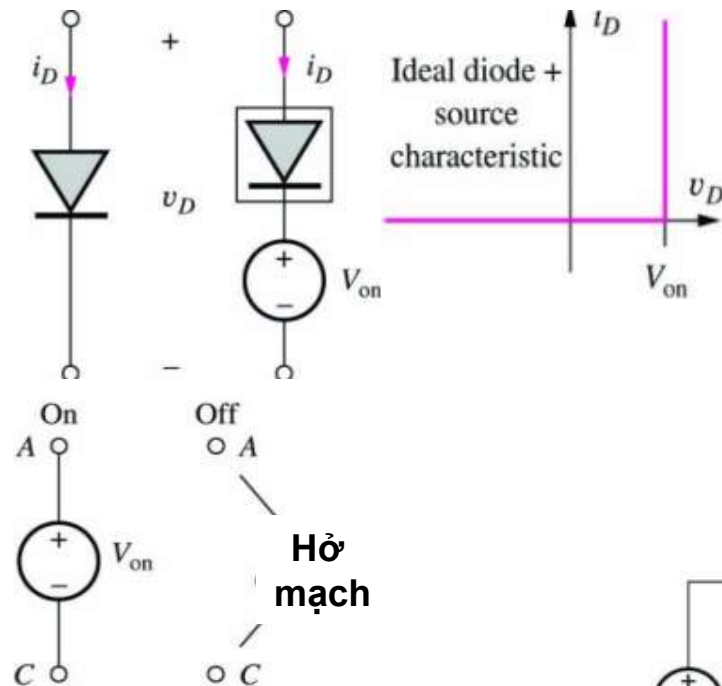
Phương trình vòng là:

$$10 + V_D + 10^4 I_D = 0$$

$$\therefore V_D = -10V \quad (\text{giả thiết đúng}).$$

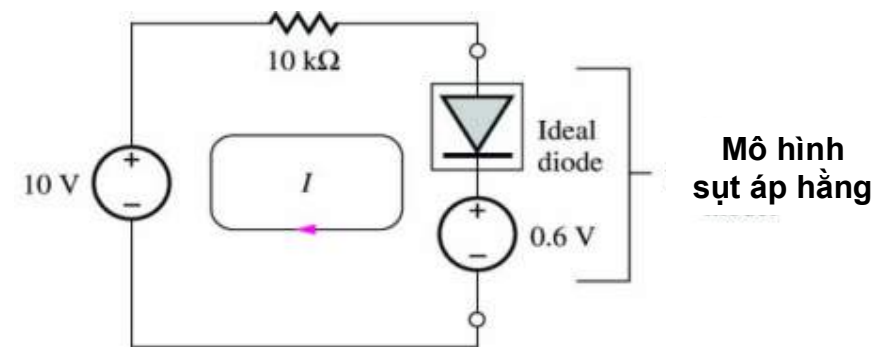
Điểm Q là (0, -10 V)

Giải tích dùng mô hình sụt áp hằng cho diode

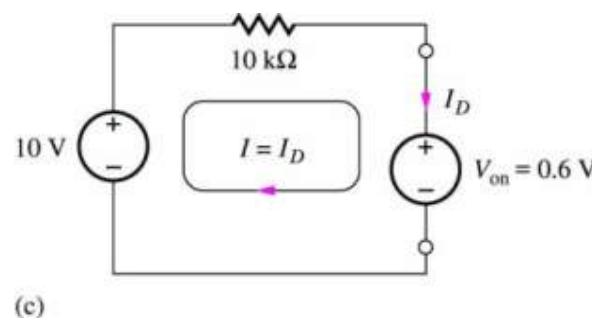


$v_D = V_{on}$ với $i_D > 0$ và
 $v_D = 0$ với $v_D < V_{on}$.

Giải tích:



Giả sử diode ON.

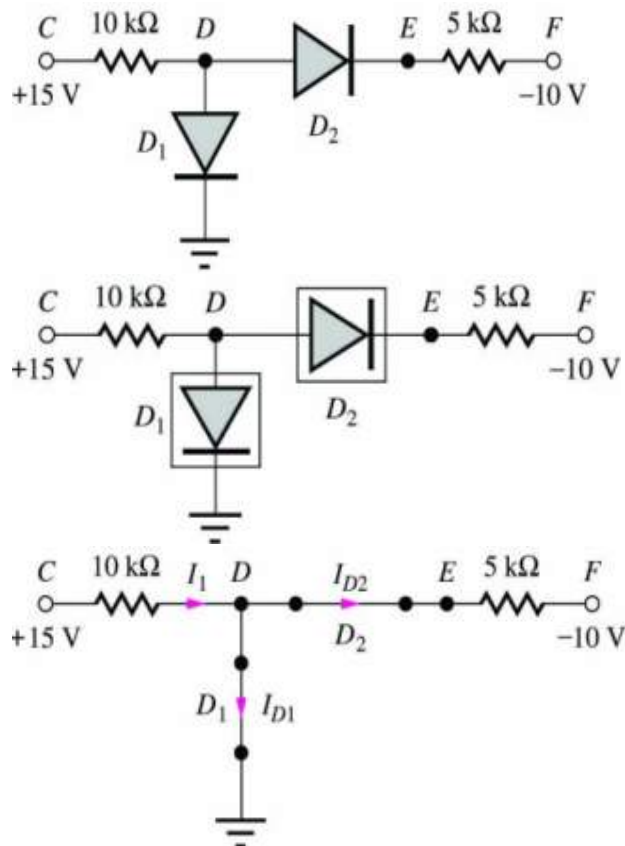


$$I_D = \frac{(10 - V_{on})V}{10\text{ k}\Omega}$$

$$= \frac{(10 - 0.6)V}{10\text{ k}\Omega} = 0.94\text{ mA}$$

Mô hình lý tưởng là mô hình sụt áp hằng với $V_{on} = 0\text{ V}$.

Giải tích mạch 2 diode



Giải tích: Mô hình diode lý tưởng được chọn. Vì nguồn 15V đang cấp dòng điện dương qua D_1 và D_2 và nguồn -10V đang cấp dòng điện dương qua D_2 , ta giả sử cả 2 diodes đều ON.

Từ điện thế tại nút D là zero do ngắn mạch của diode lý tưởng D_1 ,

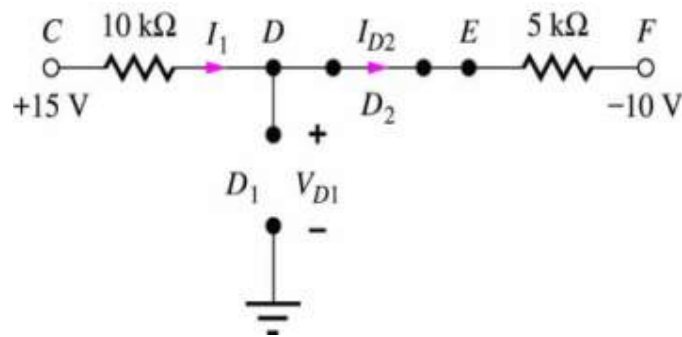
$$I_1 = \frac{(15 - 0)V}{10k\Omega} = 1.5 \text{ mA} \quad I_{D2} = \frac{0 - (-10)V}{5k\Omega} = 2 \text{ mA}$$

$$I_1 = I_{D1} + I_{D2} \quad I_{D1} = 1.5 - 2 = -0.5 \text{ mA}$$

Các điểm Q(-0.5 mA, 0 V) và (2.0 mA, 0 V)

Nhưng, $I_{D1} < 0$ thì không đúng với giả thiết là D_1 ON, do đó thử lại.

Giải tích mạch 2 diode (2)



Vì dòng trong D_1 là zero, $I_{D2} = I_1$,

$$15 - 10kI_1 - 5kI_{D2} - (-10) = 0$$

$$I_1 = \frac{25V}{15k\Omega} = 1.67mA$$

$$V_{D1} = 15 - 10kI_1 = 15 - 16.7 = -1.67V$$

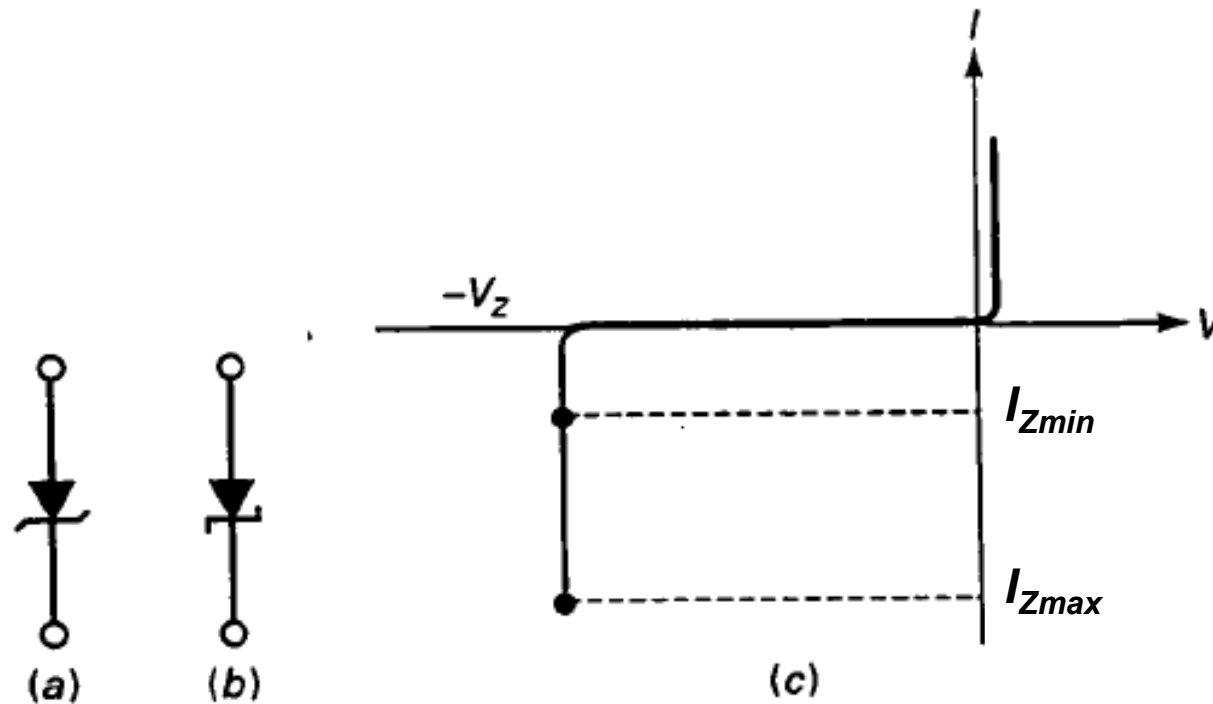
Giải tích: Từ đó dòng trong D_2 thì đúng nhưng dòng trong D_1 thì không đúng, ta giả sử tiếp D_1 OFF và D_2 ON.

Các điểm Q là D_1 : (0 mA, -1.67 V): OFF

D_2 : (1.67 mA, 0 V) : ON

4.10.2 Diode ổn áp (Zener)

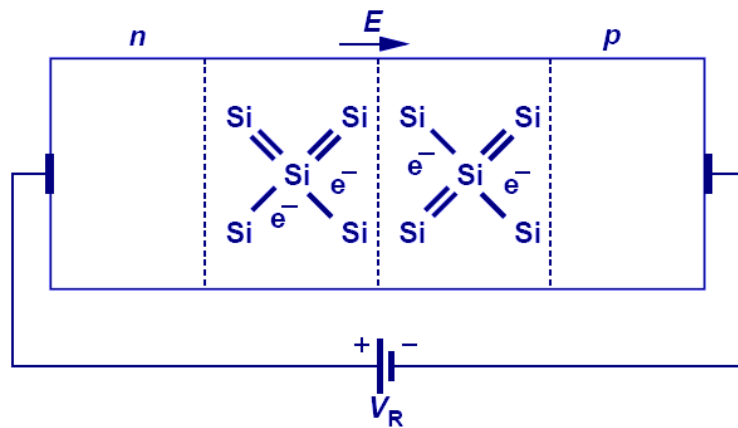
- Diode ổn áp được chế tạo dựa theo cơ chế đánh thủng (ở miền phân cực ngược) thác lũ và/hoặc đường hầm (hay Zener). ($V_Z = 2 \rightarrow 1000V$)



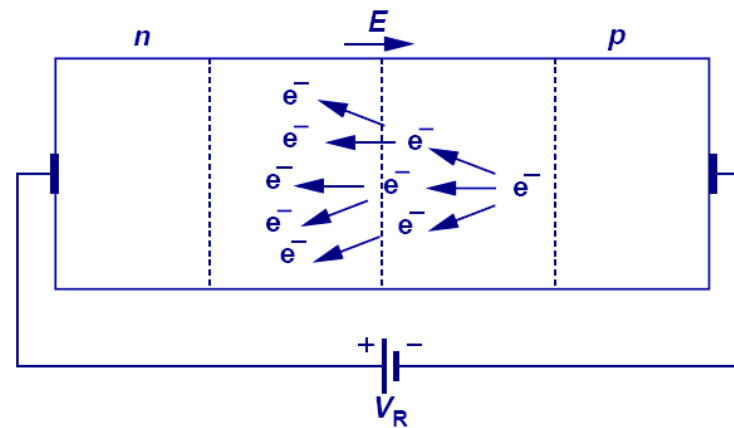
Diode Zener: (a) Ký hiệu sơ đồ mạch; (b) Ký hiệu khác; (c) đặc tuyến Volt-Ampere (I-V).

Reverse Breakdown Mechanisms

- a) Zener breakdown** occurs when the electric field is sufficiently high to pull an electron out of a covalent bond (to generate an electron-hole pair).
- b) Avalanche breakdown** occurs when electrons and holes gain sufficient kinetic energy (due to acceleration by the E-field) in-between scattering events to cause electron-hole pair generation upon colliding with the lattice.



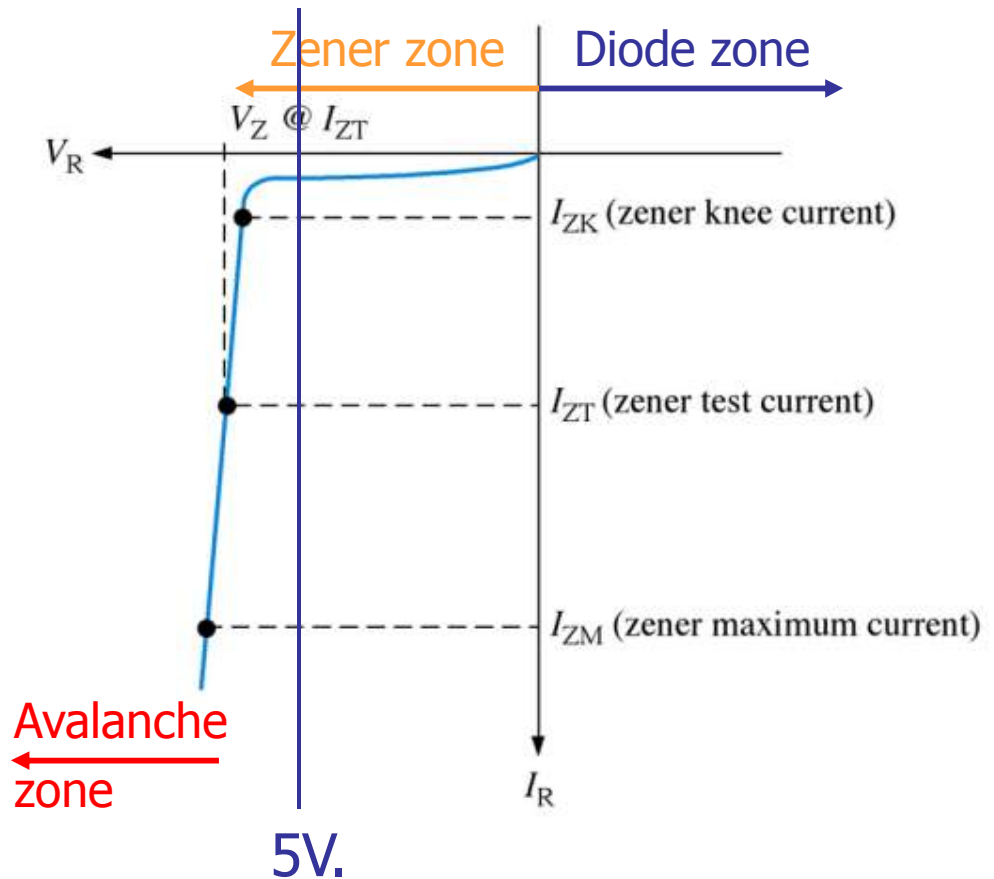
(a)



(b)

Zener Diodes – Regulation Ranges

The zener diode's breakdown characteristics are determined by the doping process. Low voltage zeners ($>5V$), operate in the zener breakdown range. Those designed to operate $<5V$ operate mostly in avalanche breakdown range. Zeners are available with voltage breakdowns of 1.8 V to 200 V.



This curve illustrates the minimum and maximum ranges of current operation that the zener can effectively maintain its voltage.

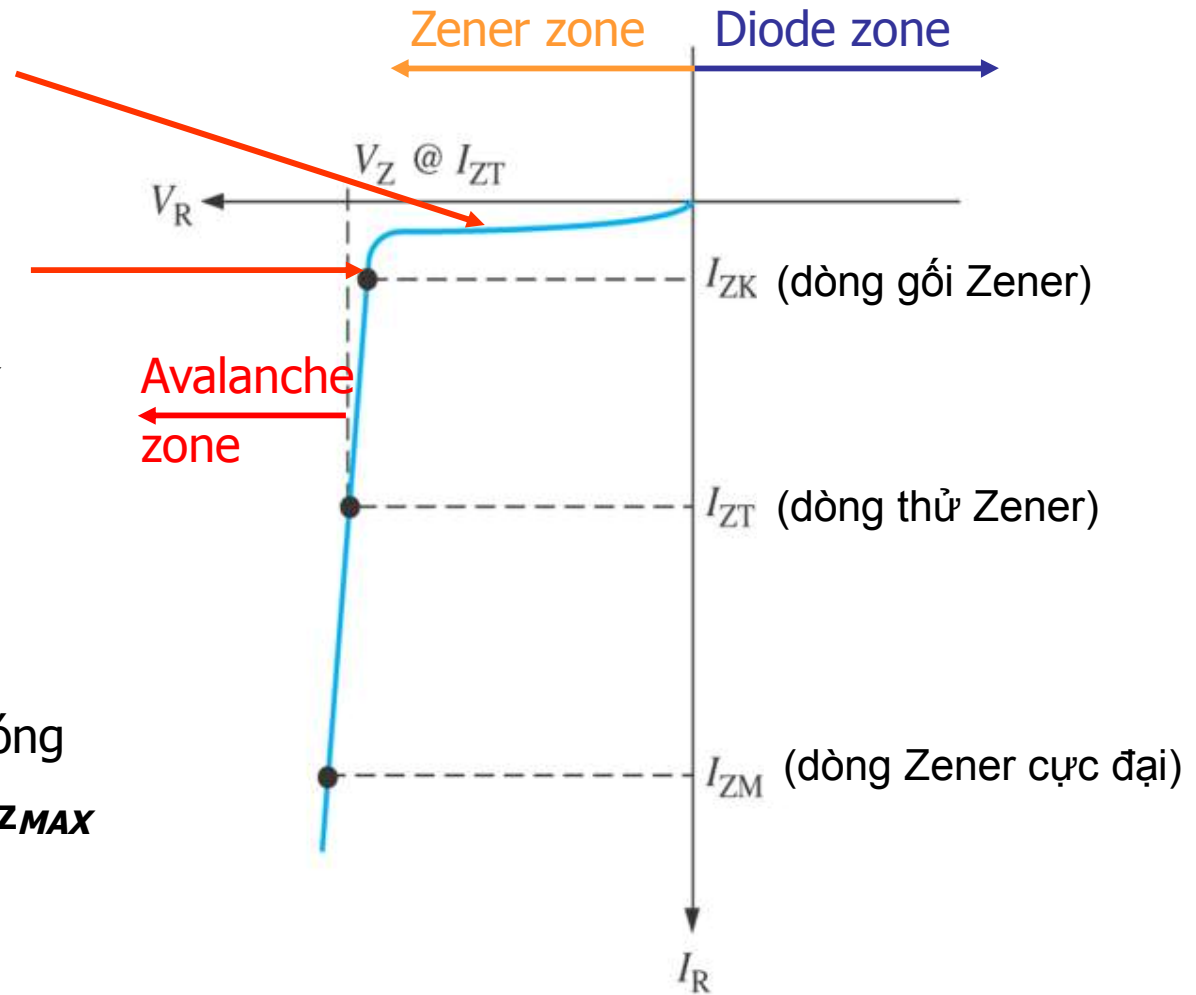
Đặc tuyến đánh thủng của diode Zener

Chú ý dòng ngược rất nhỏ (trước "knee" [đầu gối]).

Đánh thủng xảy ra @ knee.

Đặc tính đánh thủng:

- V_Z giữ gần như là hằng số
- V_Z cung cấp:
 - Điện áp chuẩn
 - Ổn định điện áp
- I_Z tăng nhanh
- I_{ZMAX} đạt được nhanh chóng
- Nếu tăng dòng vượt quá I_{ZMAX} thì diode Zener bị hư



Hệ số nhiệt TC

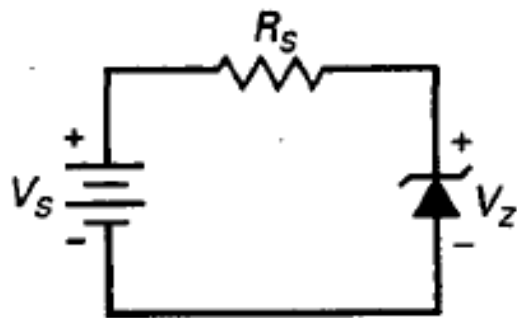
- **Định nghĩa:** Hệ số nhiệt của đại lượng X là TCX (đơn vị là $1/^{\circ}\text{C}$ hay $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ [$\text{ppm}=10^{-6}$])

$$TCX = \frac{1}{X} \frac{dX}{dT}$$

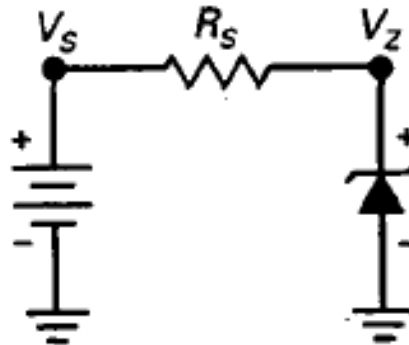
- TCV_Z có giá trị:
 - < 0 khi Zener có $V_Z < 4\text{V}$ (đánh thủng Zener)
 - > 0 khi Zener có $V_Z > 6\text{V}$ (đánh thủng thác lũ)
 - < 0, > 0, hoặc = 0 khi Zener có $4\text{V} < V_Z < 6\text{V}$

Mạch ổn áp Zener

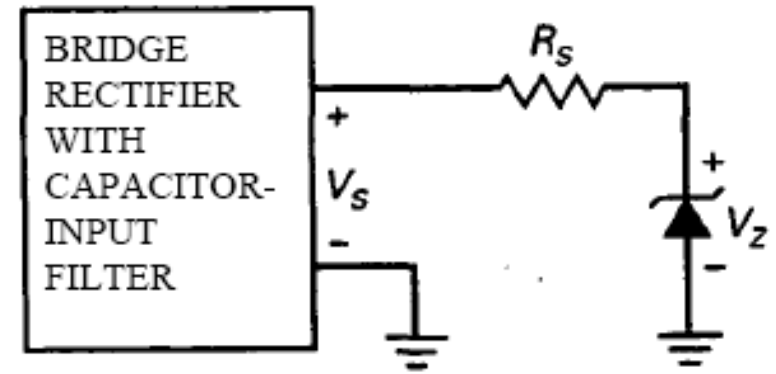
$$I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S} \quad (5-1)$$



(a)



(b)



(c)

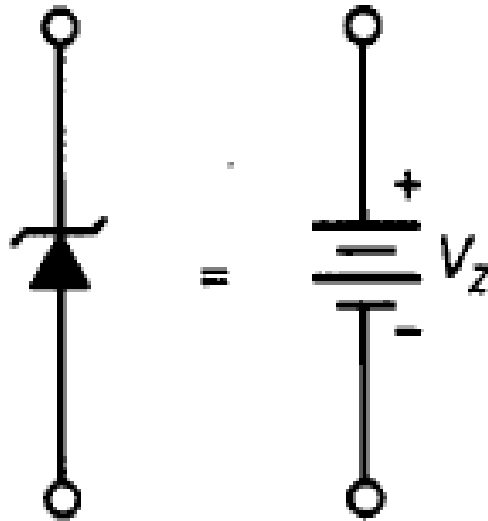
Mạch ổn áp zener. (a) Mạch cơ bản; (b) có nối đất; (c) nguồn cấp điện lái mạch ổn áp

Chú ý:

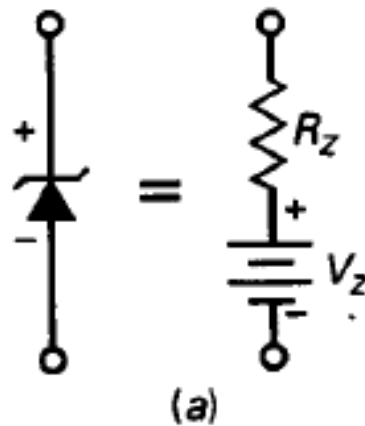
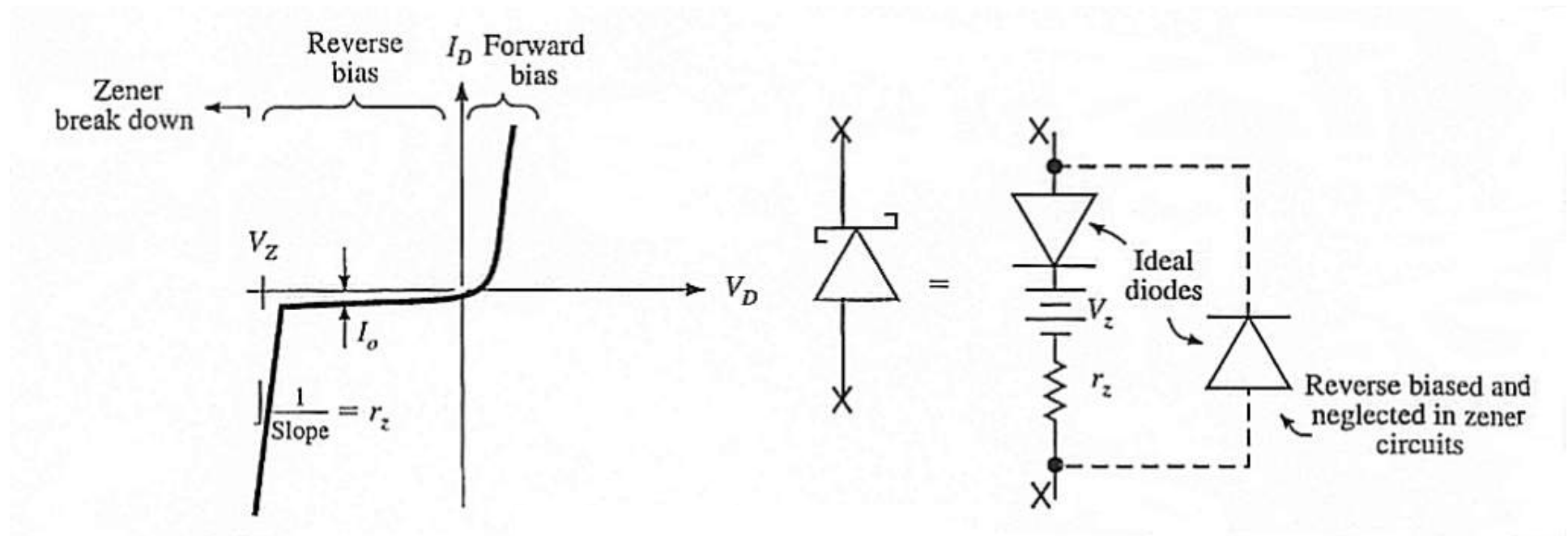
- $I_{zmin} < I_S < I_{Zmax}$
- Thường chọn $I_S = (I_{zmin} + I_{Zmax})/2$

Mô hình diode zener lý tưởng

Mô hình diode zener lý tưởng khi ở phân cực ngược $> V_Z$



Xấp xỉ bậc 2 của diode Zener



Mạch tương đương

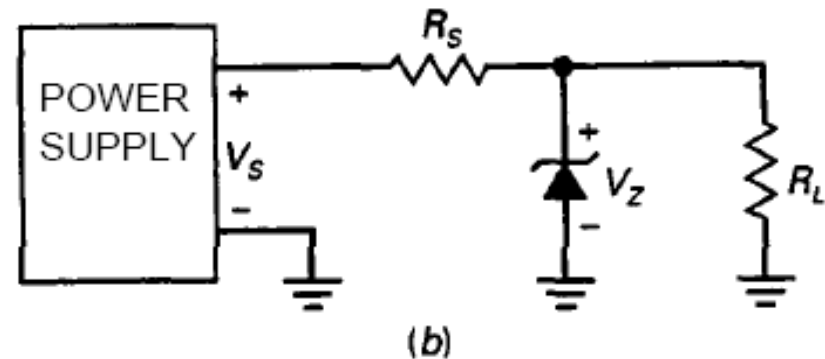
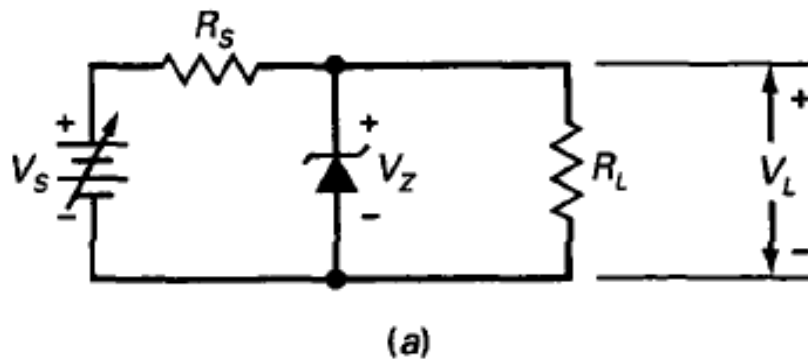
Mạch ổn áp Zener có tải

- Hoạt động đánh thủng với điện áp Thévenin đặt ở Zener là:

$$V_{TH} = V_S R_L / (R_S + R_L)$$

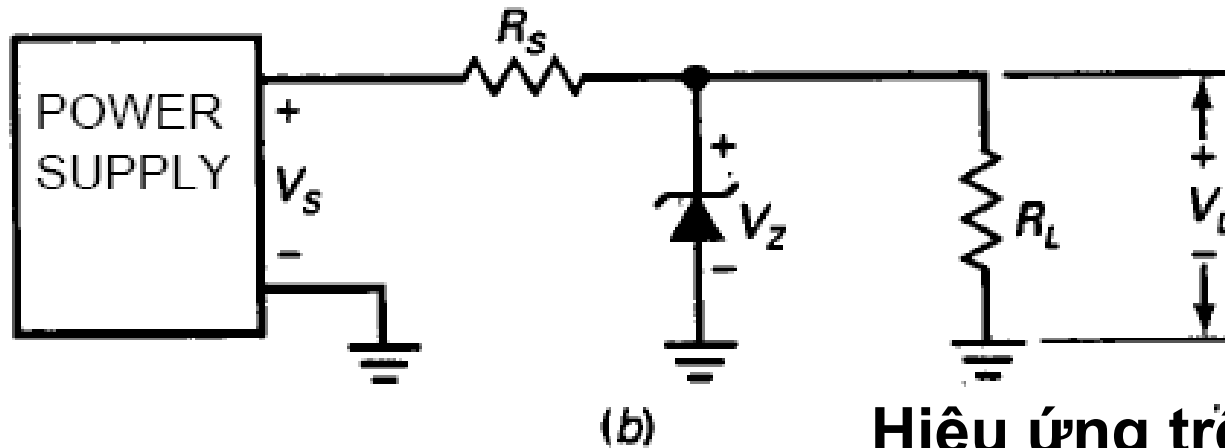
- Dòng điện nối tiếp I_S
- Dòng tải $I_L = V_L / R_L = V_Z / R_L$
- Dòng Zener $I_Z = I_S - I_L$ (chú ý điều kiện để Zener vẫn còn ổn áp!)

$$I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S} \quad (5-3)$$



Mạch ổn áp có tải (a) Mạch cơ bản; (b) Mạch thực tế

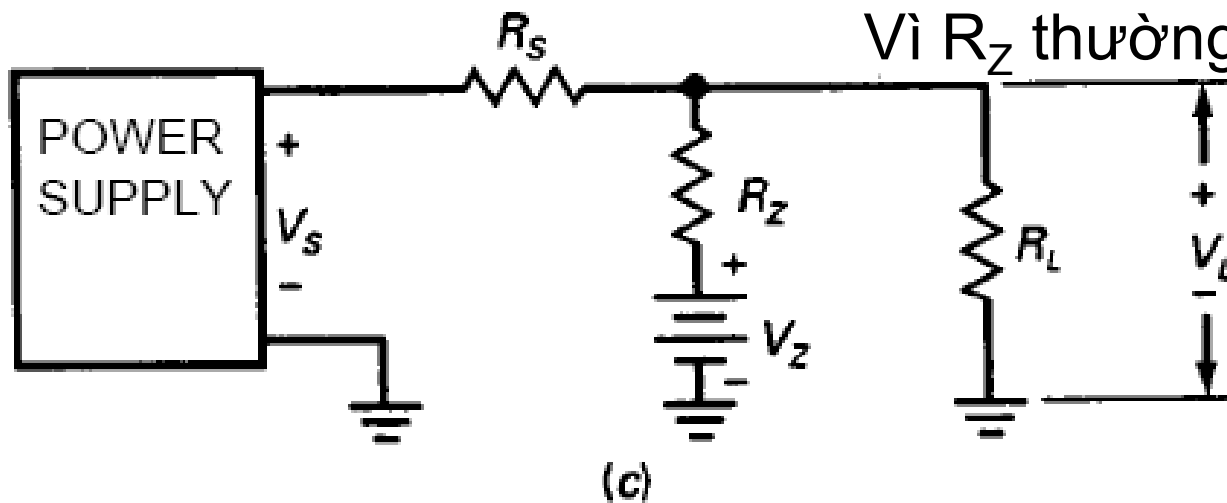
Xấp xỉ bậc 2 của diode Zener



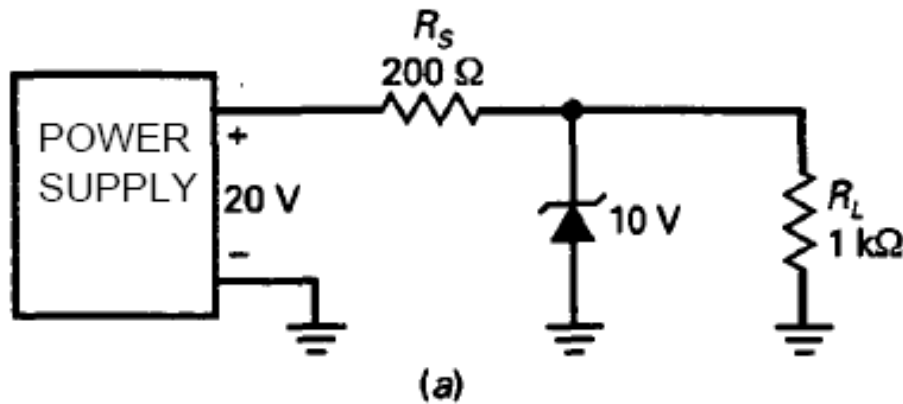
Hiệu ứng trên điện áp tải:

$$V_L = V_Z + I_Z R_Z \rightarrow \Delta V_L = I_Z R_Z$$

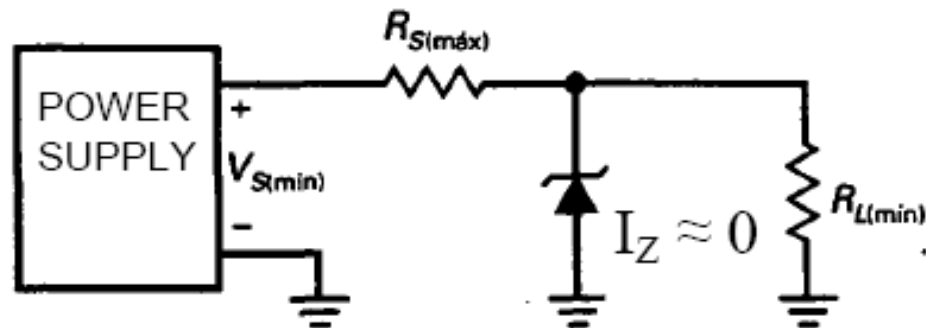
Vì R_Z thường nhỏ $\rightarrow \Delta V_L$ nhỏ!.



Điểm rời khỏi miền ổn áp



$$R_{S(\text{máx})} = \left(\frac{V_{S(\text{mín})}}{V_Z} - 1 \right) R_{L(\text{mín})} \quad (5-9)$$



$$R_{S(\text{máx})} = \frac{V_{S(\text{mín})} - V_Z}{I_{L(\text{máx})}} \quad (5-10)$$

Trường hợp xấu nhất

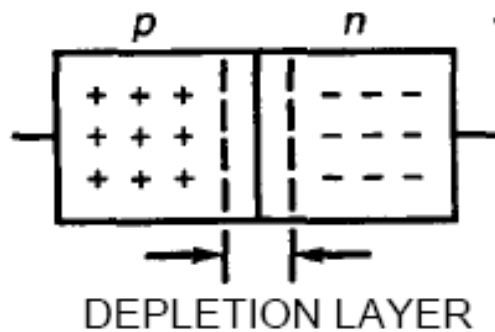
Đọc bảng dữ liệu (Data Sheet)

- **Công suất tối đa P_{ZM} :** $P_Z = V_Z I_Z < P_{ZM}$
- Giảm định mức: **Hệ số giảm định mức** (mW/°C) cho biết sự thay đổi của P_{ZM} theo nhiệt độ
- **Dòng tối đa I_{ZM} :** $I_{ZM} = P_{ZM}/V_Z$
- **Dung sai $x\%$:** $V_Z \pm x\%$
- **Điện trở Zener** (tổng trở Zener) R_{ZT} hay Z_{ZT} : điện trở động của Zener ở miền Zener

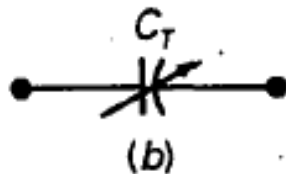
Chú ý: Các số liệu khác có thể suy ra từ sổ tay

- Tính $I_{Zmax} = P_{ZM}/V_Z$
- Chọn $I_{Zmin} = I_{Zmax}/10$

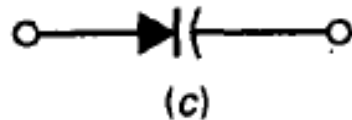
4.10.3 Diode biến dung (varactor=varicap)



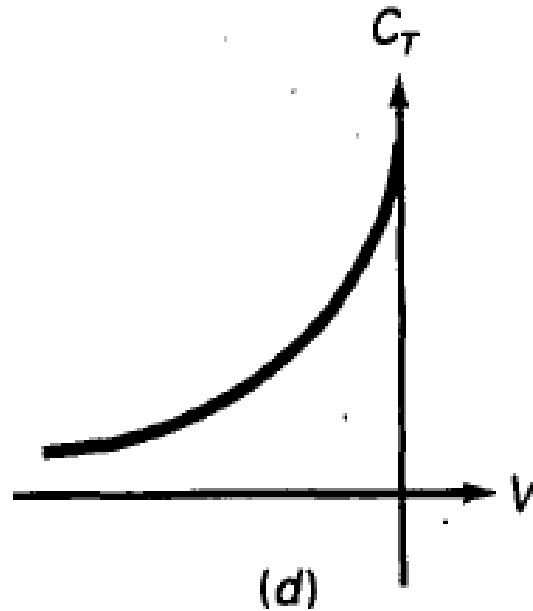
(a)



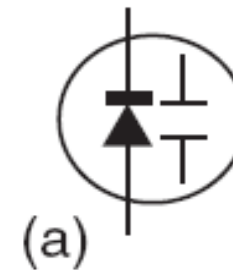
(b)



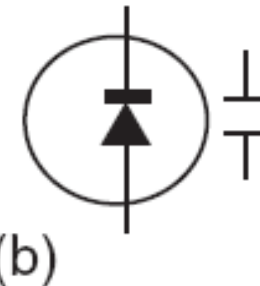
(c)



(d)



(a)



(c)



Các ký hiệu

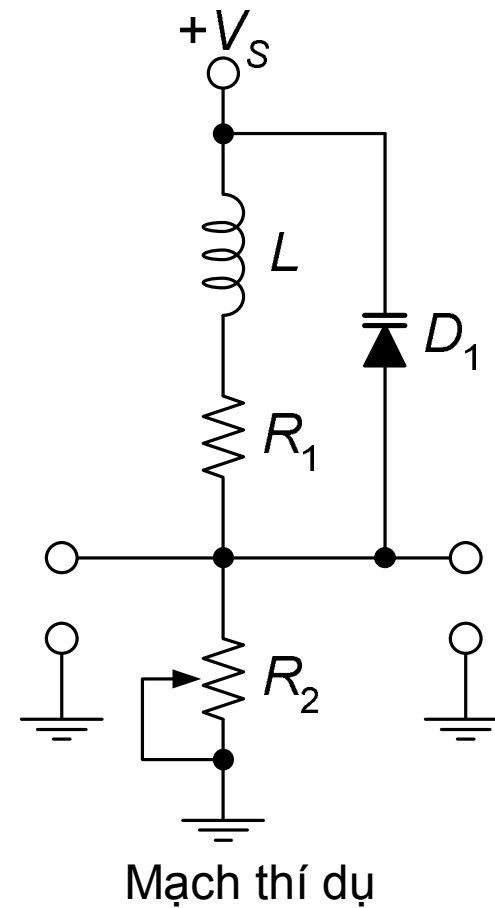
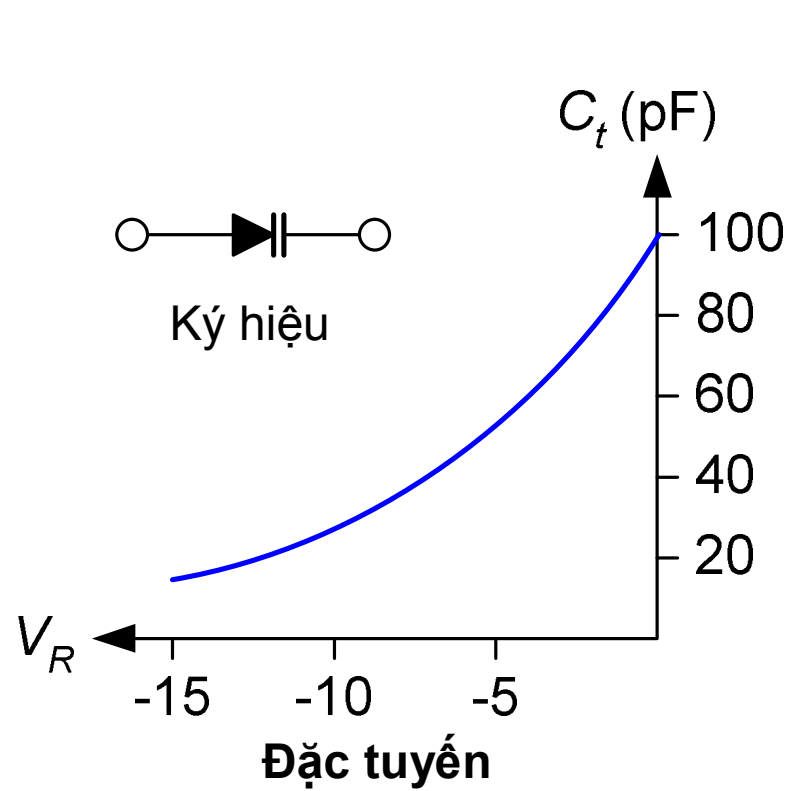
(a) và (b) thường dùng ở Mỹ

(c) và (d) thường dùng ở Anh

Đặc điểm:

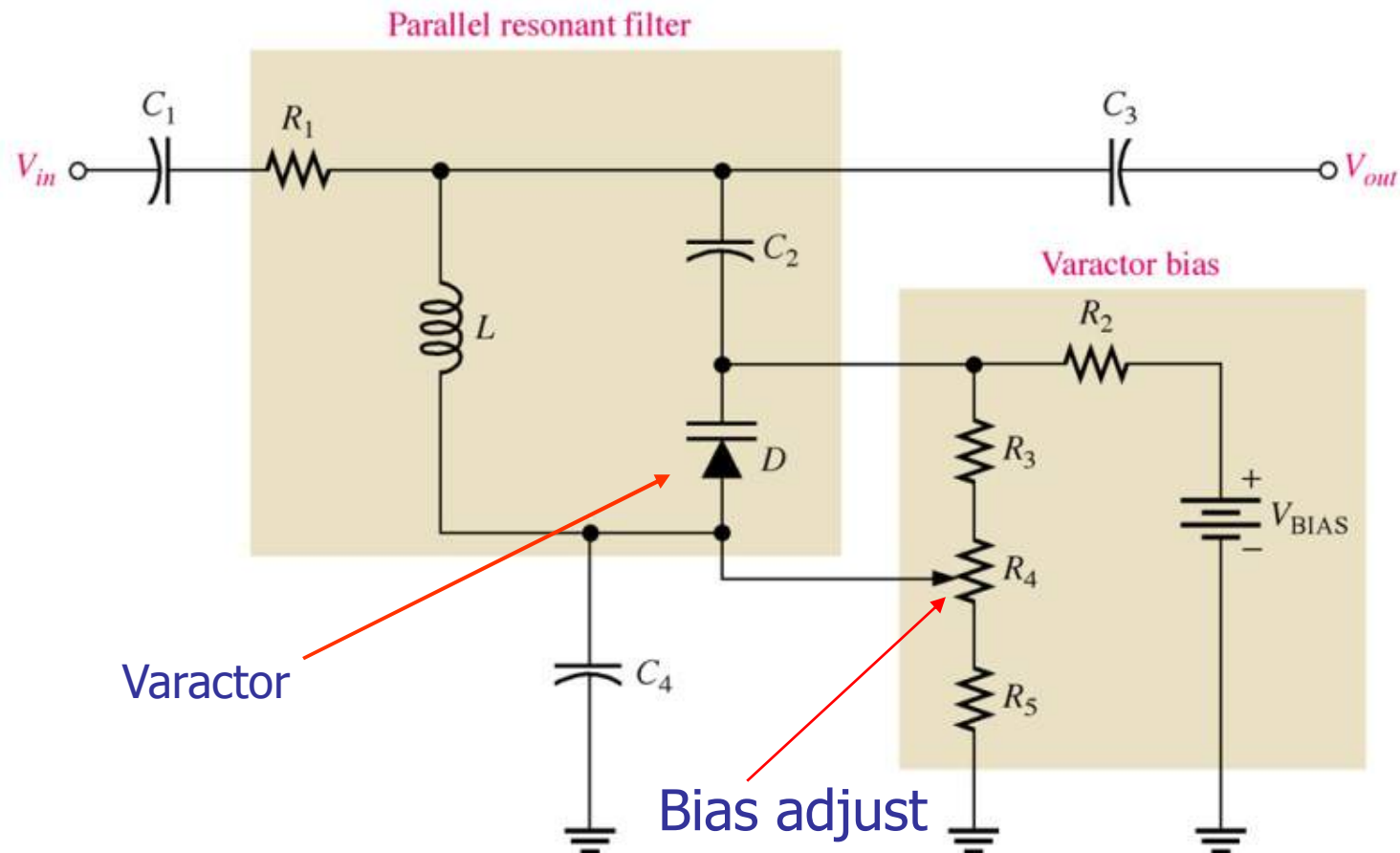
Dựa trên sự thay đổi điện dung của miền nghèo khi được phân cực ngược

Diode biến dung – Thí dụ (2)



Diode biến dung (3)

Diode biến dung được dùng trong các mạch lọc làm dụng cụ chỉnh được cho chọn lựa tần số cộng hưởng.



Varactor Diodes

Capacitance Tolerance Range

- This is the equivalent of the value tolerance range of a resistor.

ie: 1N5148 – Nominal value = 47pF

- Tolerance range is 42.3pF to 51.7pF

Tuning Ratio (TR) or (Capacitance Ratio)

- Refers to Rangeability (value @ Bias $V_{\max}$ vs Bias $V_{\min}$)
- $V_{\min}$ is 4V bias (C_4) (for the 1N5139, $C_4 = 6.8\text{pF}$)
- $V_{\max}$ is 60V bias (C_{60}) (for the 1n5139, $C_{60} = 2.3\text{pF}$)

For the 1N5139, $TR = 2.9$

Quality Factor (Q) describes energy loss in the device. High Q desirable)

Temperature Coefficient - Δ Capacitance vs Δ Temp

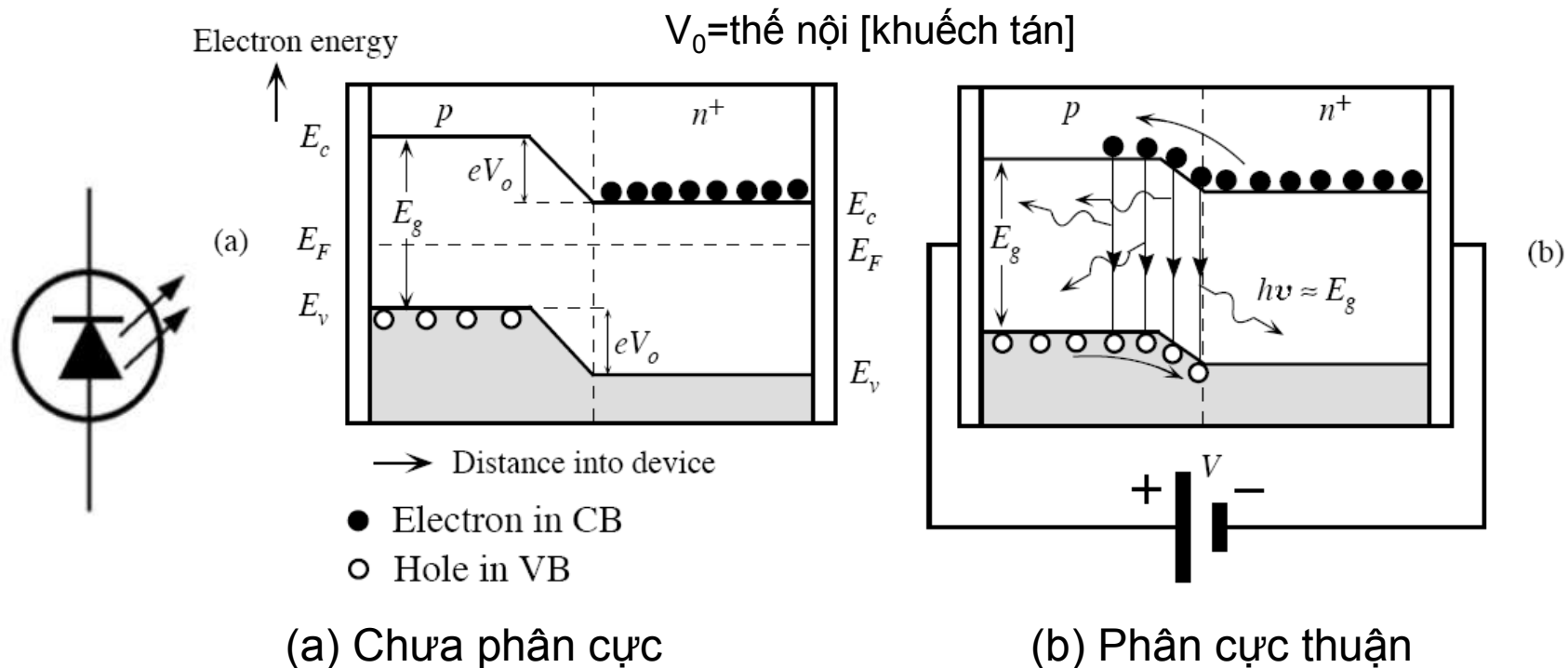
4.10.4 LED (Light Emitting Diode = Diode phát quang)

Nguyên tắc hoạt động

- LED chủ yếu là chuyển tiếp PN được làm từ bán dẫn hỗn hợp có khe năng lượng trực tiếp (TD: GaAs), trong đó sự tái hợp cặp điện tử-lỗ (EHP) làm phát xạ photon. Khi đó photon được sinh ra có bước sóng

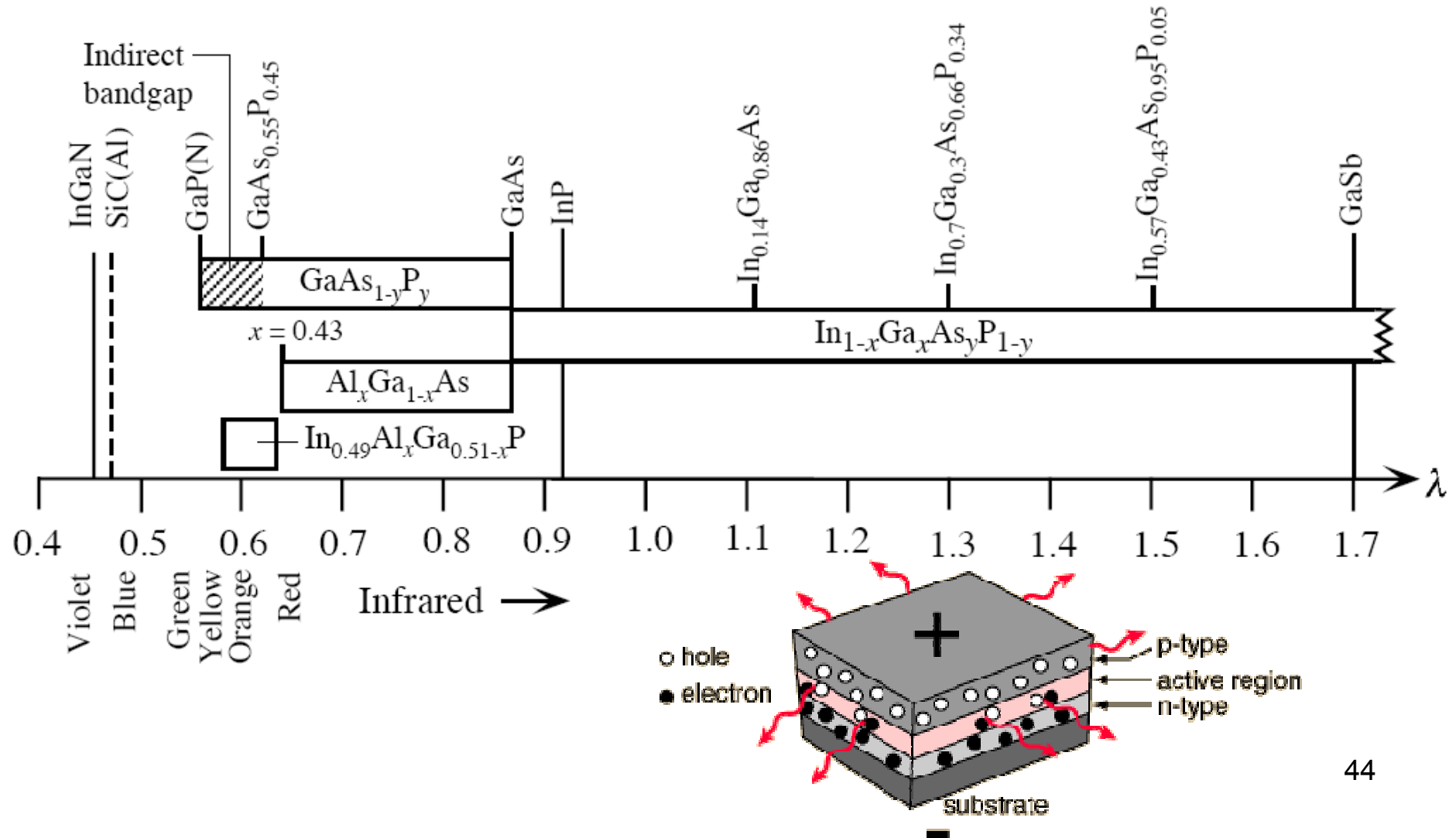
$$\lambda \text{ [nm]} = 1240/E_g \text{ [eV]}$$

- Giản đồ năng lượng sau minh họa sự sinh ra ánh sáng trong LED, trong đó phía N pha nồng độ n^+ vì muốn miền nghèo phần lớn nằm bên P và muốn cung cấp nhiều điện tử khuếch tán từ N vào P và nó được duy trì bằng phân cực thuận cho LED..



Vật liệu chế tạo LED

- Phần lớn LED sử dụng bán dẫn hỗn hợp có khe năng lượng trực tiếp, hình sau cho thấy bước sóng ánh sáng được sinh ra λ với vật liệu tương ứng



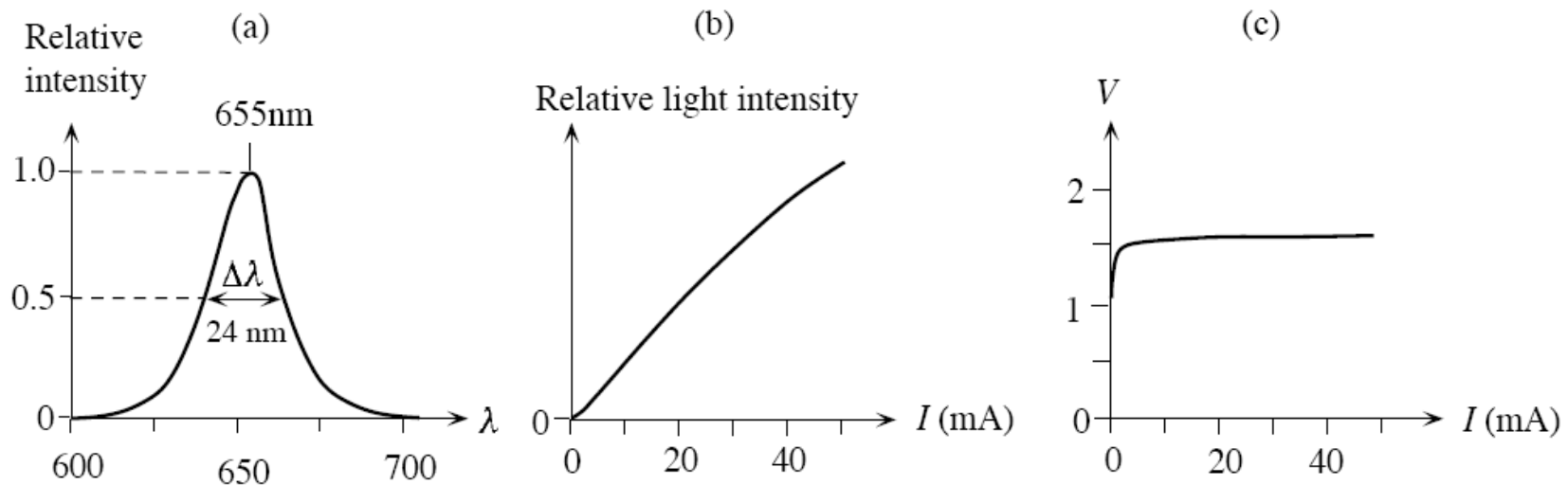
Các vật liệu bán dẫn thường dùng cho LED

Bán dẫn	Nền/Đế	D/I	λ (nm)	η_{external} (%)	Chú thích
GaAs	GaAs	D	870 - 900	10	Infrared LEDs
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 0.4$)	GaAs	D	640 - 870	5 - 20	Red to IR LEDs. DH
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($y \approx 2.20x$, $0 < x < 0.47$)	InP	D	1 - 1.6 μm	> 10	LEDs in communications
InGaN alloys	GaN or SiC Sapphire	D	430 - 460	2	Blue LED
			500 - 530	3	Green LED
SiC	Si; SiC	I	460 - 470	0.02	Blue LED. Low efficiency
$\text{In}_{0.49}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{P}$	GaAs	D	590 - 630	1 - 10	Amber, green red LEDs
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y < 0.45$)	GaAs	D	630 - 870	< 1	Red - IR
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y > 0.45$) (N or Zn, O doping)	GaP	I	560 - 700	< 1	Red, orange, yellow LEDs
GaP (Zn-O)	GaP	I	700	2 - 3	Red LED
GaP (N)	GaP	I	565	< 1	Green LED

$$\eta_{\text{external}} = \frac{P_{\text{out}}(\text{Optical})}{IV} \times 100\%$$

D=trực tiếp; I=gán tiếp; DH= cấu trúc dị thể kép; η_{external} =hiệu suất lượng tử ngoài
 Các kênh truyền thông quang sử dụng bước sóng 850 nm (mạng cục bộ)
 và 1.3 và 1.55 μm (khoảng cách xa).

Đặc tính của LED (thí dụ)



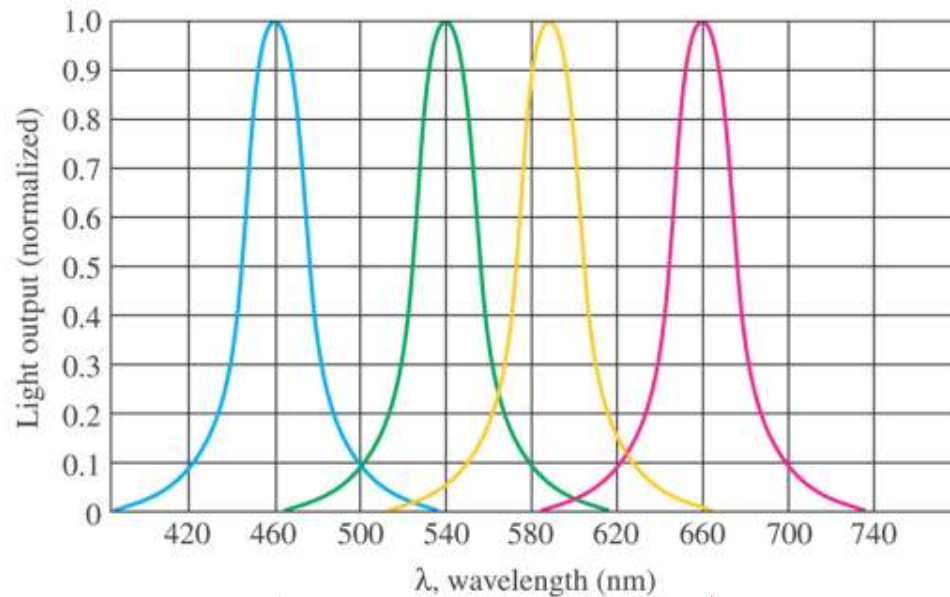
(a) Phổ ánh sáng ra tiêu biểu (cường độ sáng tương đối với bước sóng) từ LED đỏ GaAsP.

(b) Công suất ánh sáng phát ra tiêu biểu theo dòng điện thuận.

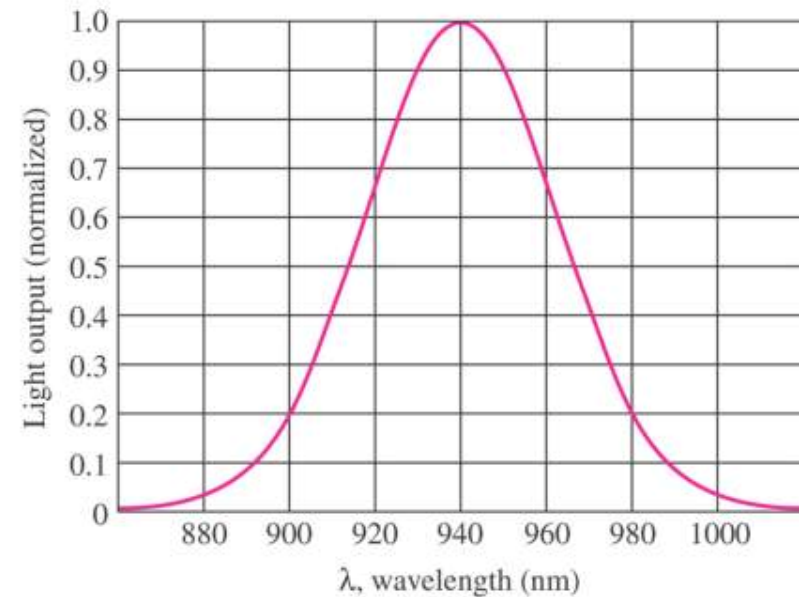
(c) Đặc tuyến I - V tiêu biểu của LED, điện áp ON khoảng 1.5 V.

- **Đặc tuyến I - V :** tương tự diode thường, nhưng $V_{ON} > 0.7V$ (từ 1.2V đến 4.5V tùy theo loại LED với vật liệu gì, tiêu biểu là 2V với LED ánh sáng thấy được), điện áp đánh thủng nhỏ ($V_{BR} \sim 3 \rightarrow 5V$)
- Ánh sáng phát ra tỉ lệ thuận với dòng qua LED (nếu dòng qua LED chưa đến bão hòa)

LED – Spectral Curves



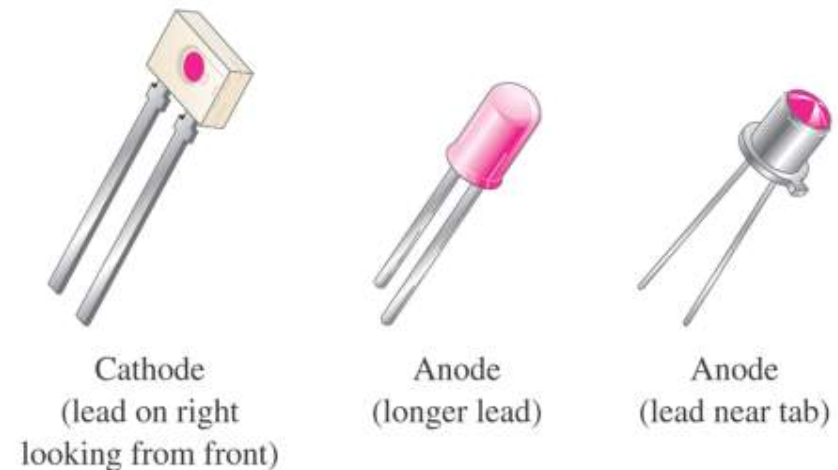
(a) Visible light



(b) Infrared (IR)

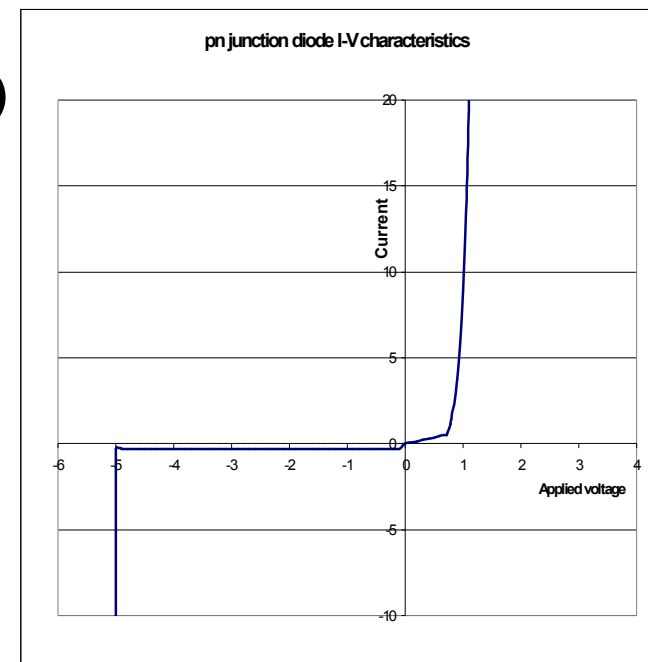
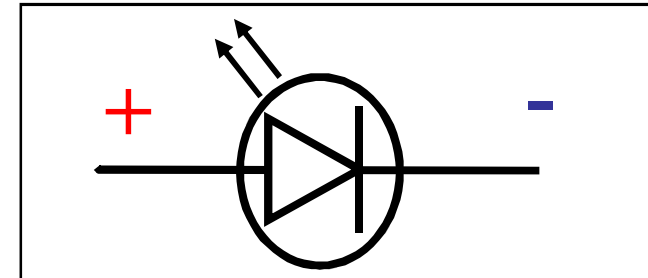
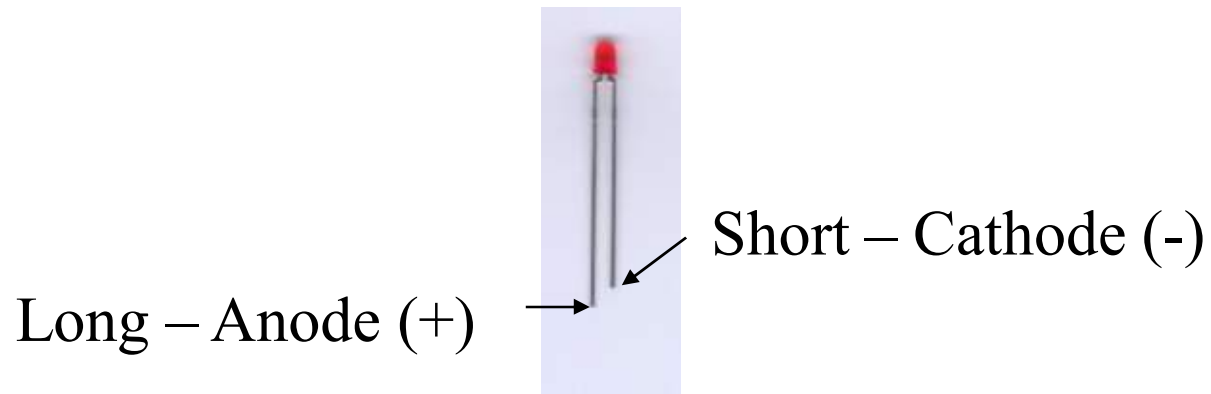
Note the wavelengths of the various colors and infrared.

Note lead designations to the right.



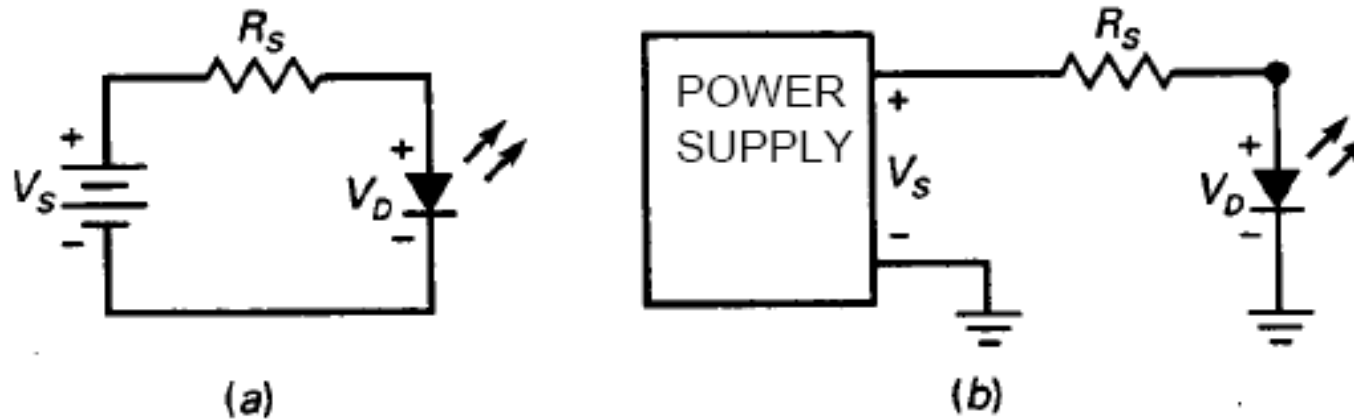
LED

- An Optoelectronic Device
 - Polarity Important



- Brighter as Current Increases
- Junction Voltage ~ 1.78 V (Red LED)

Mạch lái LED đơn giản



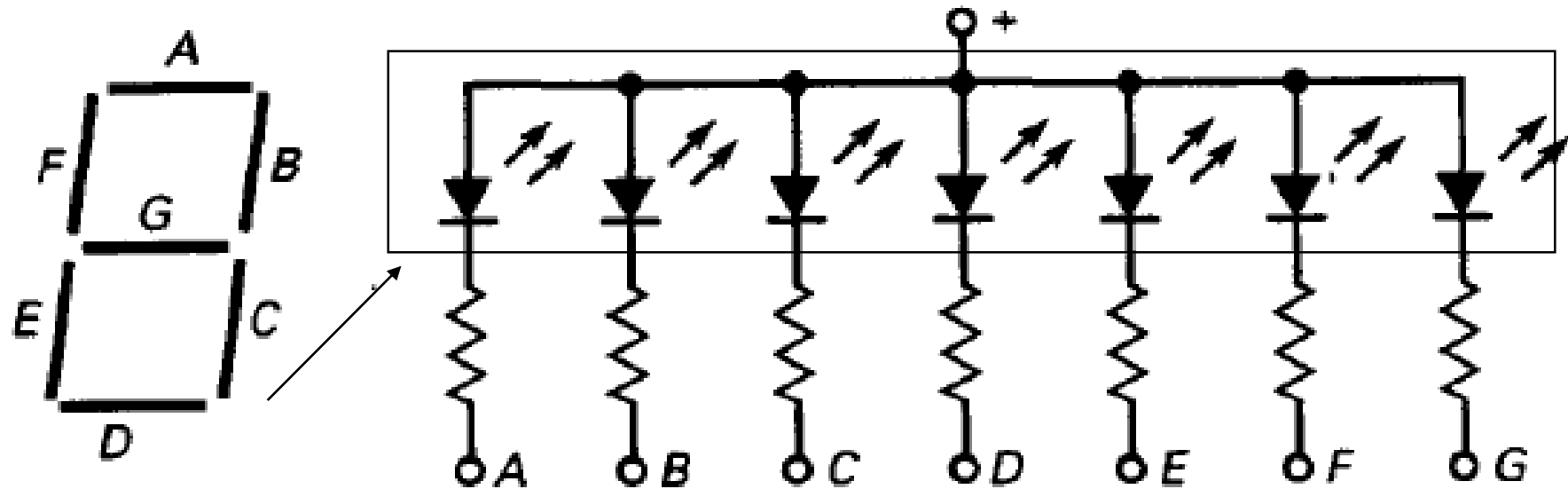
Mạch chỉ thị dùng LED: (a) Mạch cơ bản; (b) mạch thực tế
Điện trở hạn dòng R_S được tính như sau:

$$R_S = (V_S - V_D) / I_S$$

Với các giá trị tiêu biểu của LED là: $V_D=2V$, $I_D=10mA$

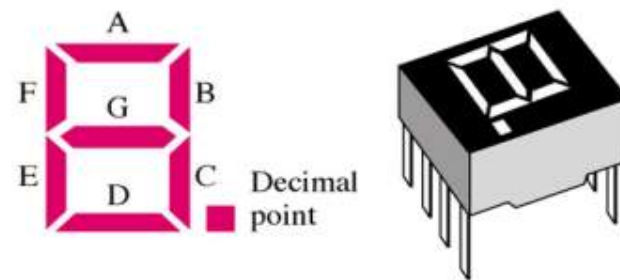
Hiển thị LED 7 đoạn

TD: loại CA (Common Anode)

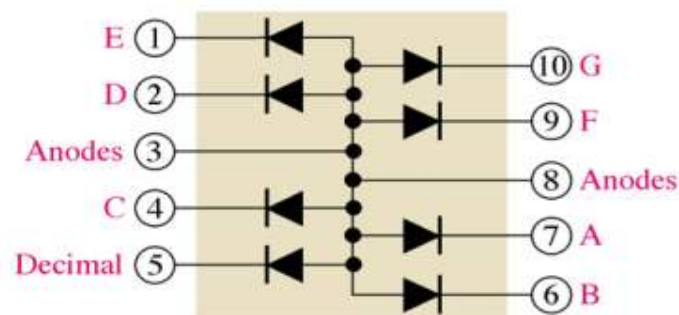


Optical Diodes

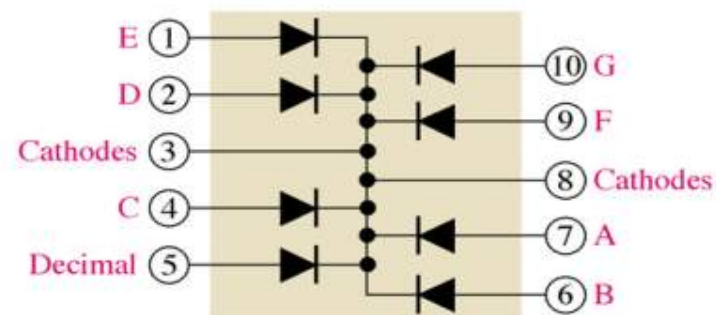
The seven segment display is an example of LEDs use for display of decimal digits.



(a) LED segment arrangement and typical device



(b) Common anode



(c) Common cathode

Some Types of LEDs



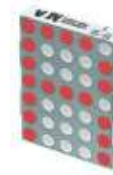
Bargraph



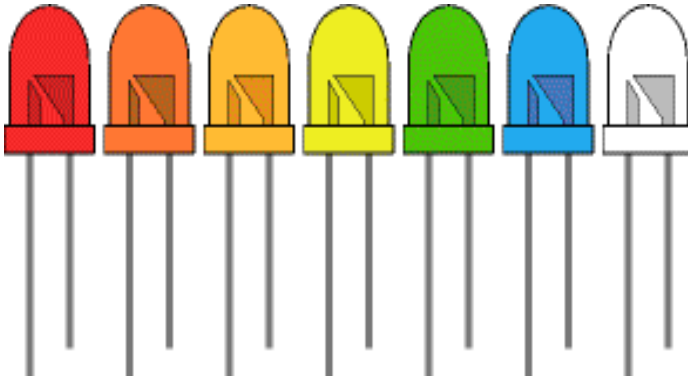
7-segment



Starburst

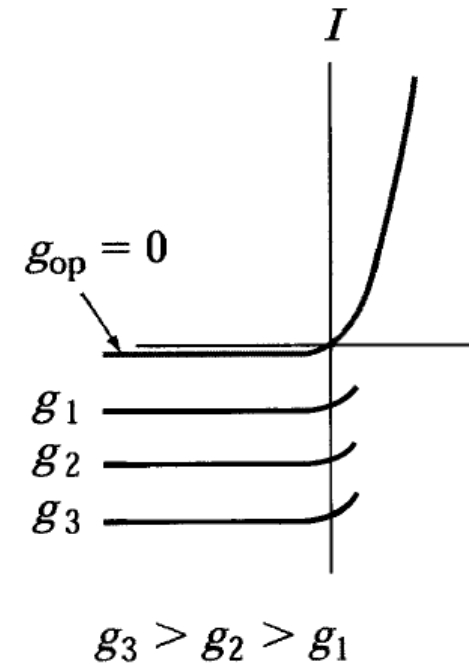
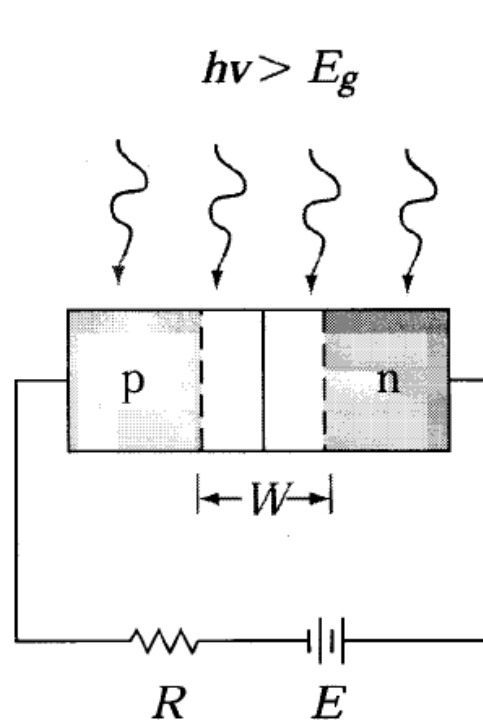
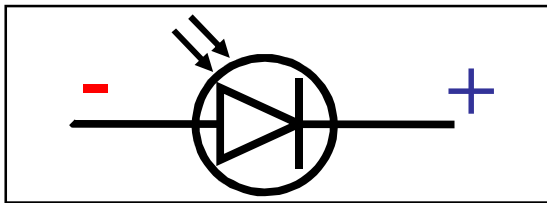


Dot matrix



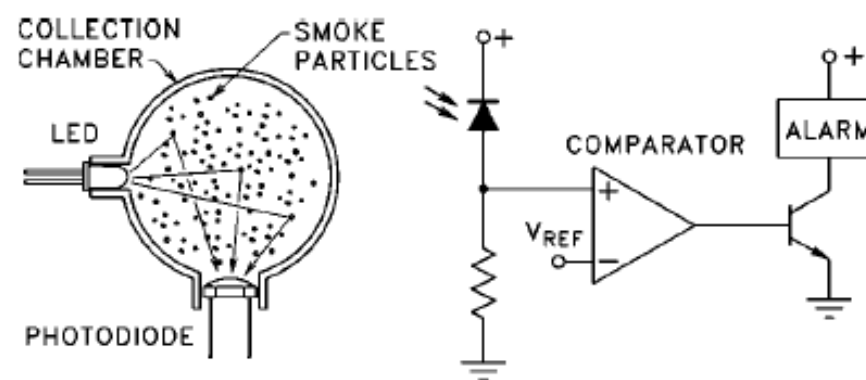
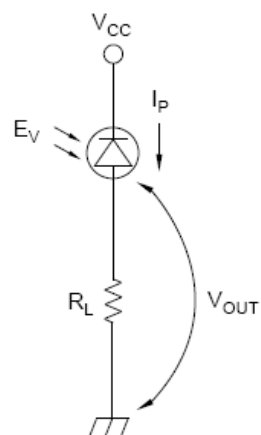
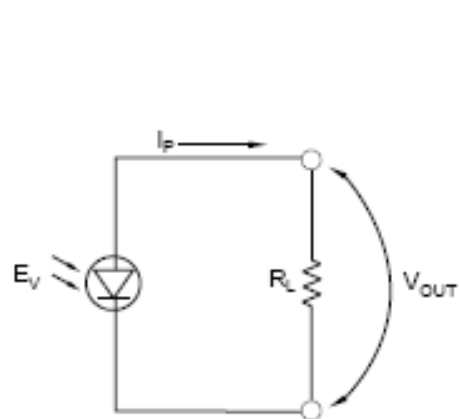
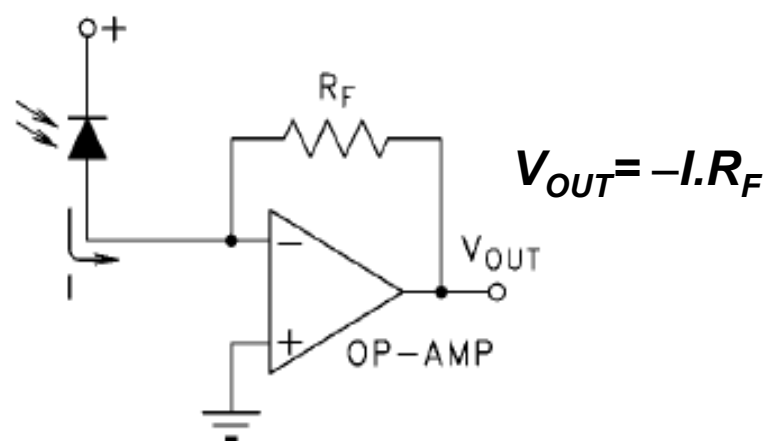
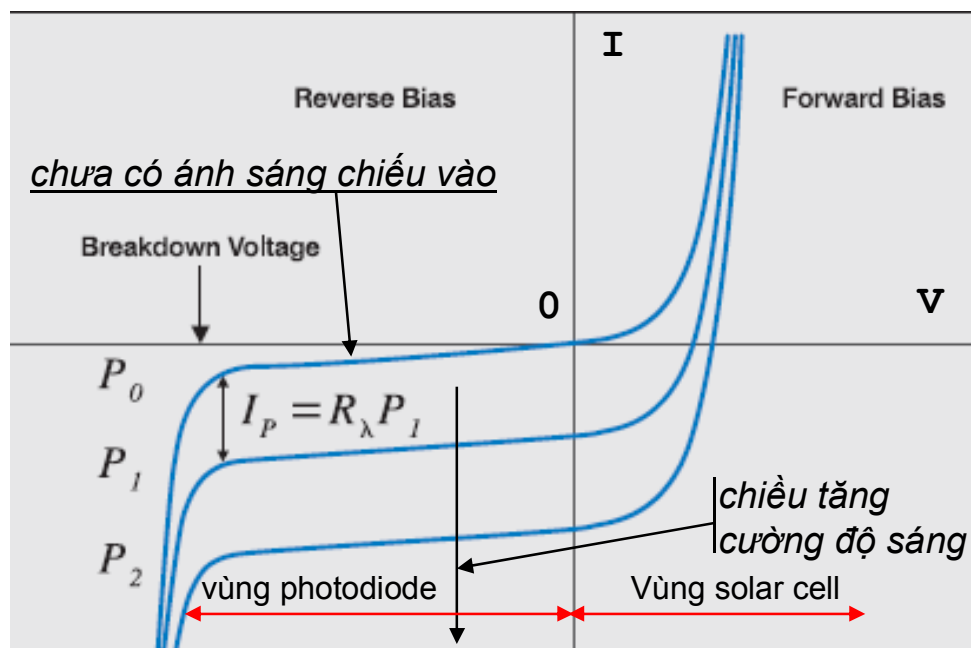
4.10.5 Photodiode (diode [thu] quang) (PD)

- **Cấu tạo:** tiếp xúc PN
- **Nguyên tắc hoạt động:** dựa trên sinh cặp điện tử-lỗ làm thay đổi sự dẫn điện
- **Đặc tuyến I-V:** góc phần tư III ứng dụng thu quang, góc phần tư IV làm pin mặt trời (solar cell)



g = công suất quang 53

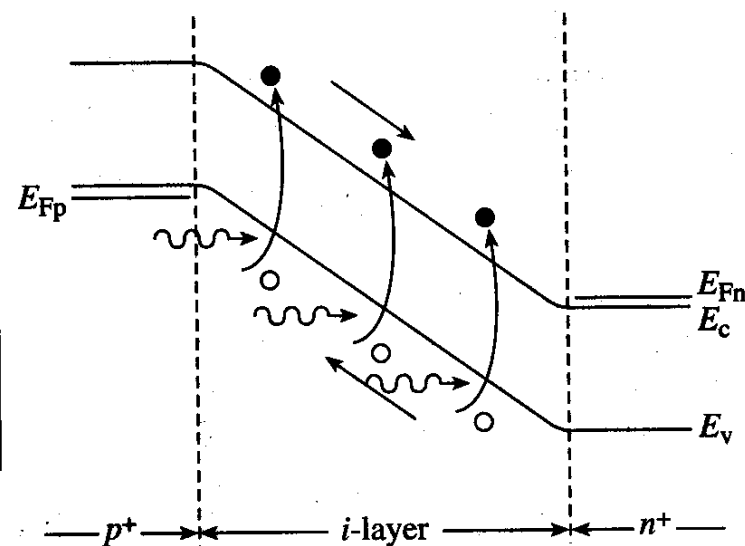
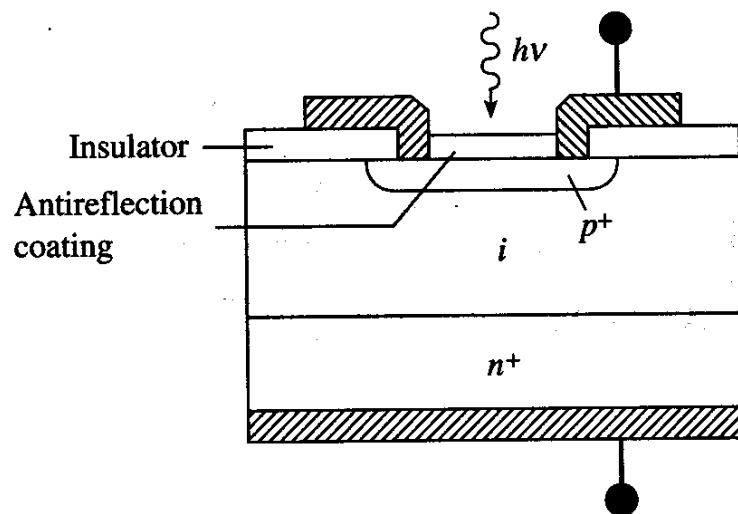
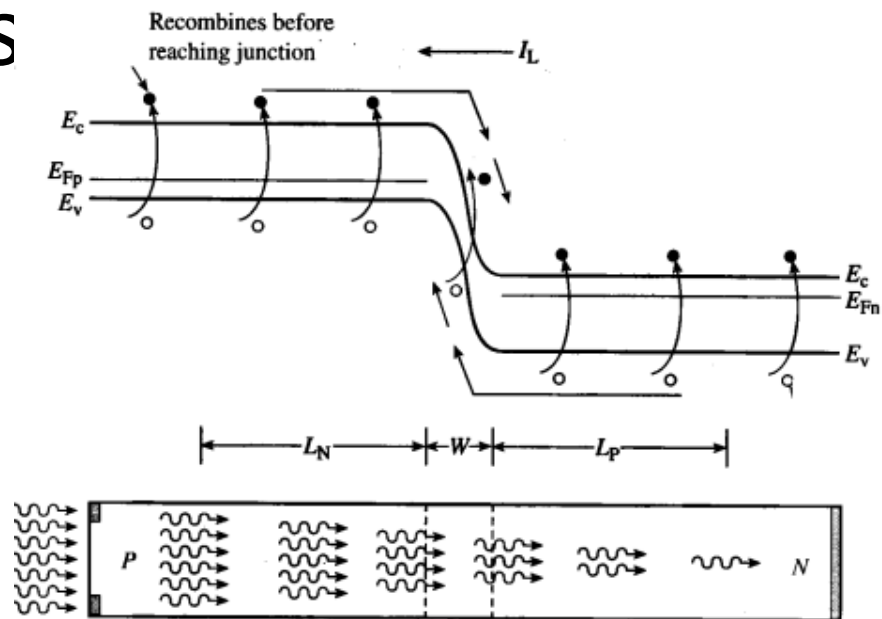
Photodiode (2)



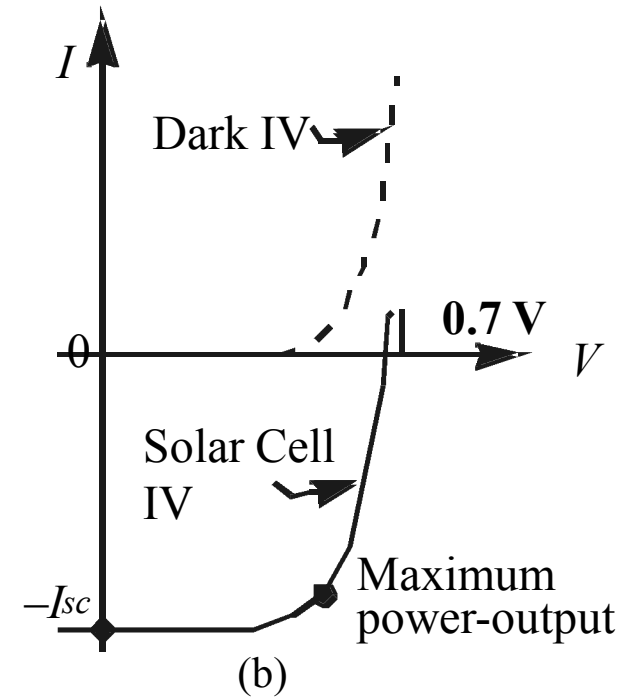
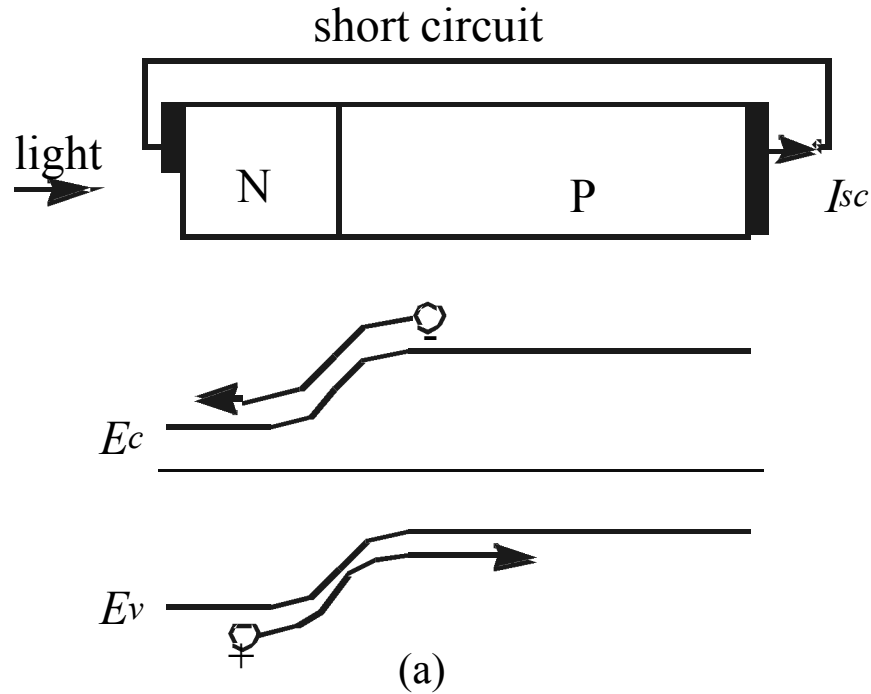
Smoke Detector

p-i-n Photodiodes

- Only electron-hole pairs generated in depletion region (or near depletion region) contribute to current
- Only light absorbed in depletion region contributes to generation
 - Stretch depletion region
 - Can also operate near avalanche to amplify signal



Solar Cells

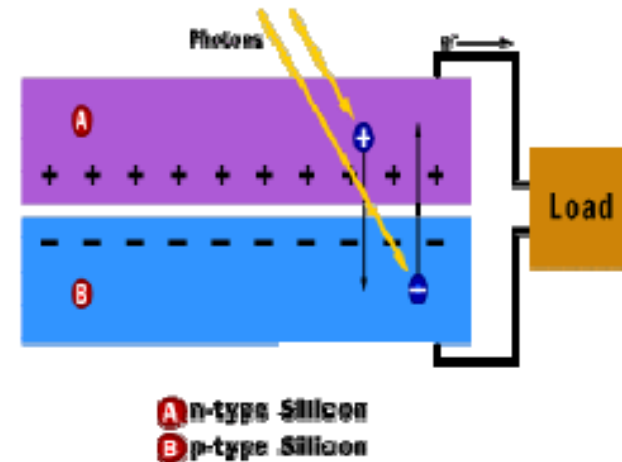


Solar Cells

Also known as *photovoltaic cells*, solar cells can convert sunlight to electricity with 15-30% energy efficiency

Solar cell: Example of simple PN junction

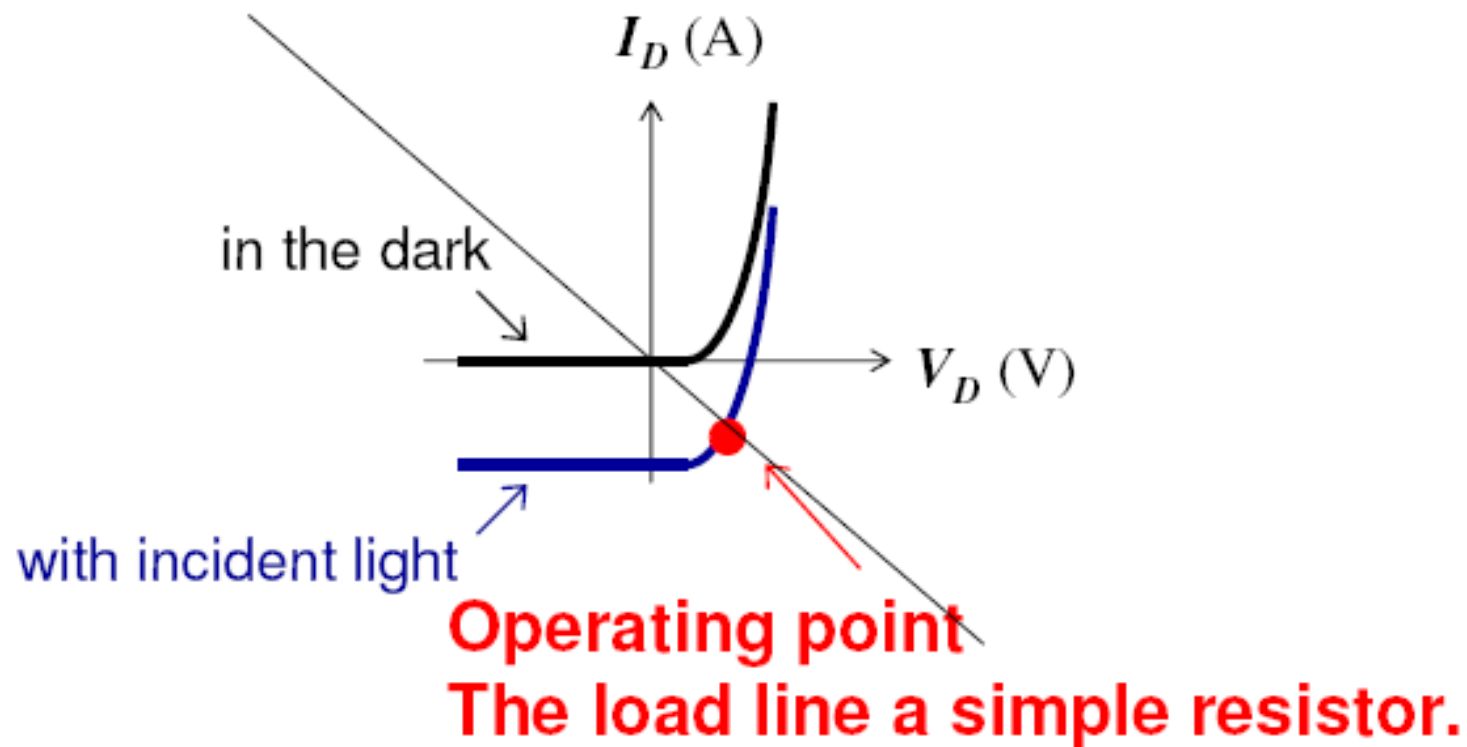
- What is a solar cell?
 - Device that converts sunlight into electricity
- How does it work?
 - In simple configuration, it is a diode made of PN junction
 - Incident light is absorbed by material
 - Creates electron-hole pairs that transport through the material through
 - Diffusion (concentration gradient)
 - Drift (due to electric field)



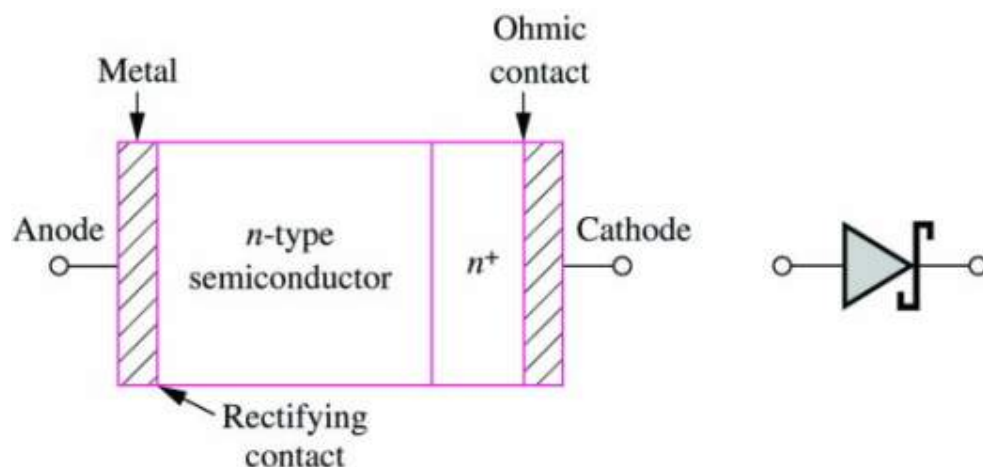
PN Junction Diode

Photovoltaic (Solar) Cell

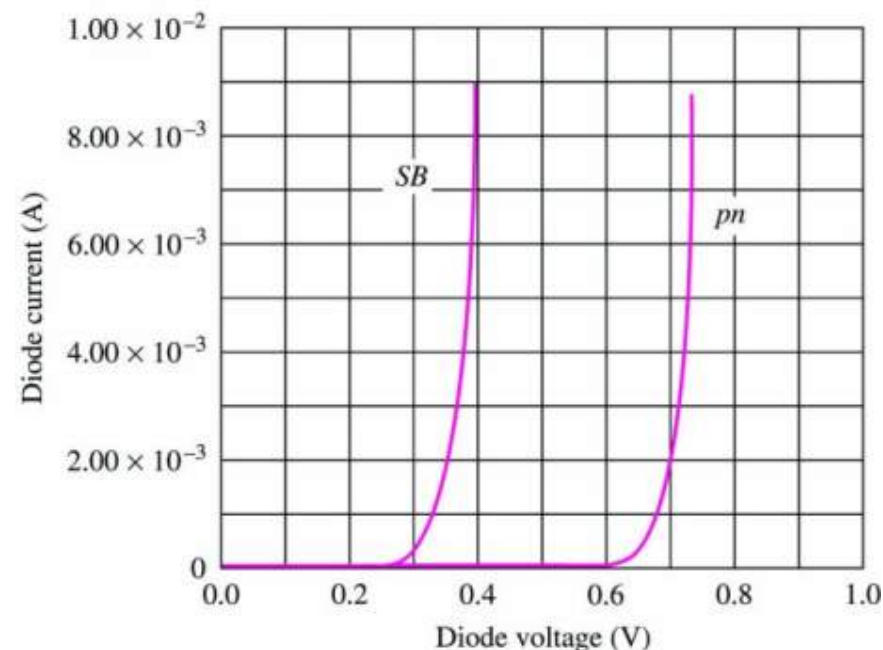
$$I_D = I_S (e^{qV_D/kT} - 1) - I_{optical}$$



4.10.6 Diode (rào thế) Schottky



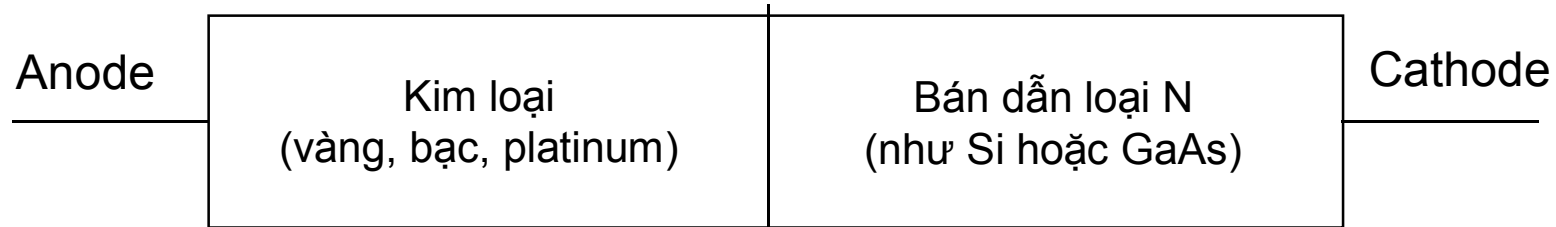
One semiconductor region of the *pn* junction diode is replaced by a non-ohmic rectifying metal contact. A Schottky contact is easily added to *n*-type silicon, metal region becomes anode. *n*⁺ region is added to ensure that cathode contact is ohmic.



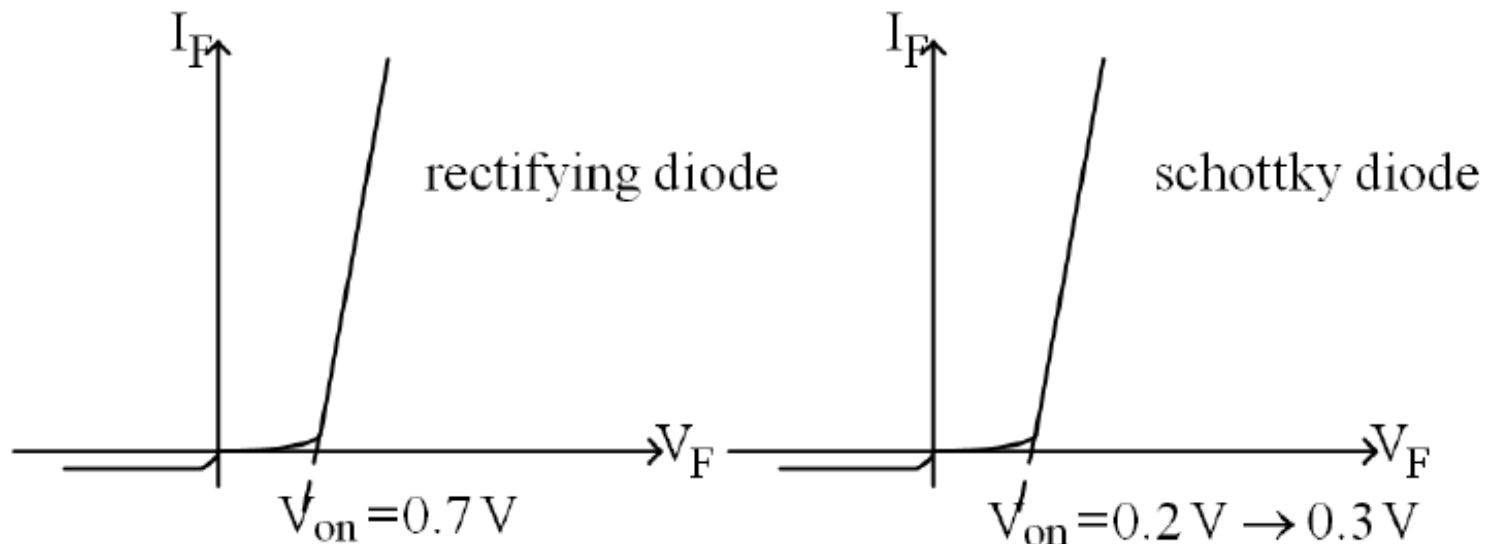
Schottky diode turns on at lower voltage than *pn* junction diode, has significantly reduced internal charge storage under forward bias.

Đặc điểm: tiếp xúc M-S (kim loại-bán dẫn), V_{ON} thấp, chuyển mạch nhanh

Chuyển tiếp M-S



- **Diode Schottky** còn được gọi là **diode “hạt dẫn nóng”** (‘hot-carrier’ diode).
- Hoạt động ở phân cực thuận.
- Dòng ngược trong diode chỉ lưu được sinh ra bởi hạt dẫn thiểu số
- Dòng ngược trong diode Schottky được sinh ra bởi điện tử.
- Dễ dàng dẫn hơn do V_{ON} nhỏ, chuyển mạch nhanh hơn → ứng dụng trong mạch có tần số hoạt động cao



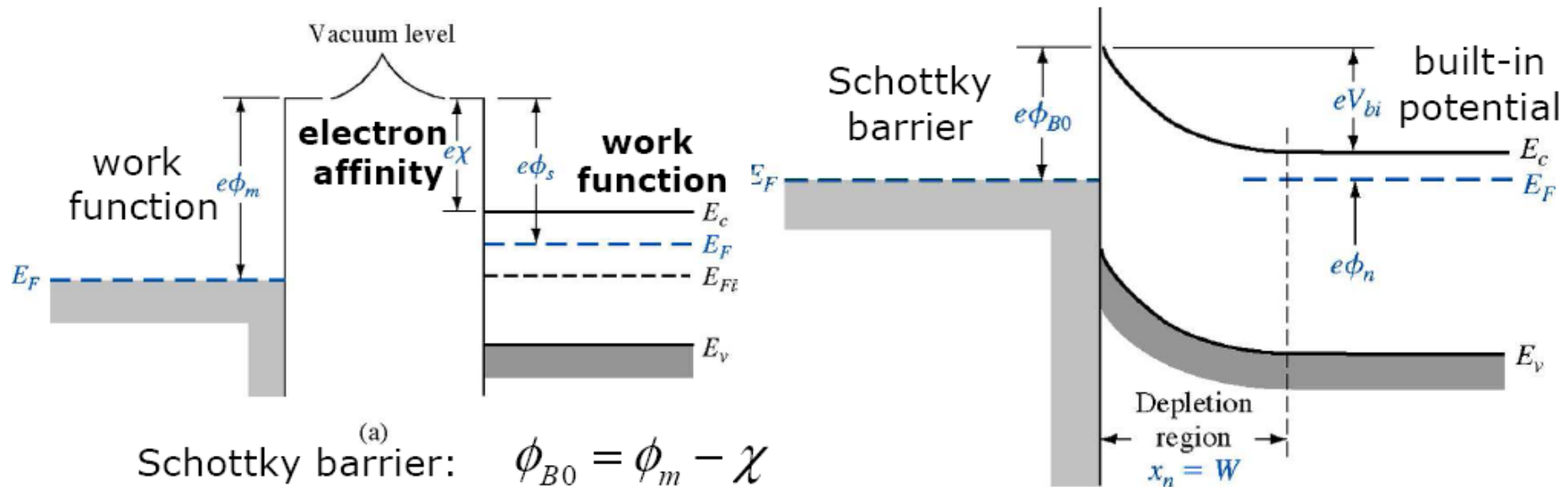
Schottky Barrier: Current Flow

- Electrons can flow from the metal to the semiconductor and vice-versa.
- When external bias is applied, current flows in the device which occurs by the following mechanisms:
 - **Thermionic emission**: electrons with energy greater than the barrier height $e(V_{bi}-V)$ can overcome the barrier and pass across the junction. As the bias changes the barrier to be overcome by electrons changes and the electron current injected changes.
 - **Tunnelling**: electrons can tunnel through the barrier.
- The saturation current in the Schottky barrier is much higher than the p-n junction. This results in a turn-on voltage for a forward-bias conducting state at a very low bias, but also results in a high reverse current.

P-N vs Schottky Diode

p-n Diode	Schottky Diode
Reverse current due to minority carriers diffusing to the depletion layer → strong temperature dependence	Reverse current due to majority carriers that overcome the barrier → less temperature dependence
Forward current due to minority carrier injection from n- and p- sides	Forward current due to majority injection from the semiconductor
Forward bias needed to make the device conducting (the cut-in voltage) is large	The cut-in voltage is quite small
Switching speed controlled by recombination of minority charge carriers	Switching speed controlled by thermalisation of “hot” injected electrons across the barrier ~ps (majority carrier device). ⁶²

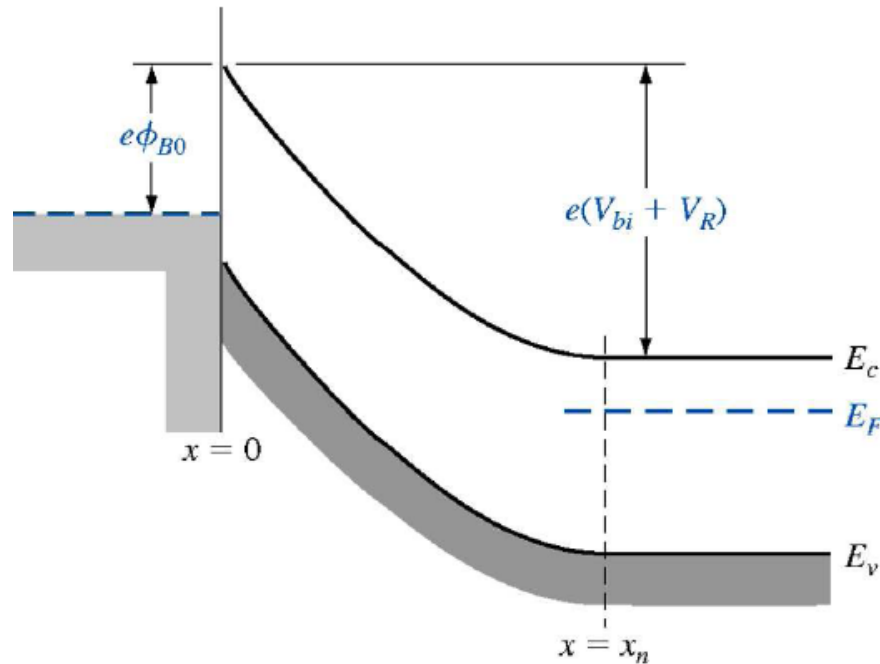
Metal-Semiconductor Contact



built-in potential $V_{bi} = \phi_{B0} - \phi_n = \phi_m - \chi - \phi_n = \phi_m - \phi_s = \phi_{ms}$

- Work function is the difference between vacuum level and the Fermi level
 - when two materials are placed in contact, electrons will flow from the one with the smaller work function until the Fermi levels equilibrate.
- Similar to p-n junctions: Fermi-level is uniform across the junction when in equilibrium (i.e., no current, no temperature difference, etc.)

Schottky Junction Characteristics



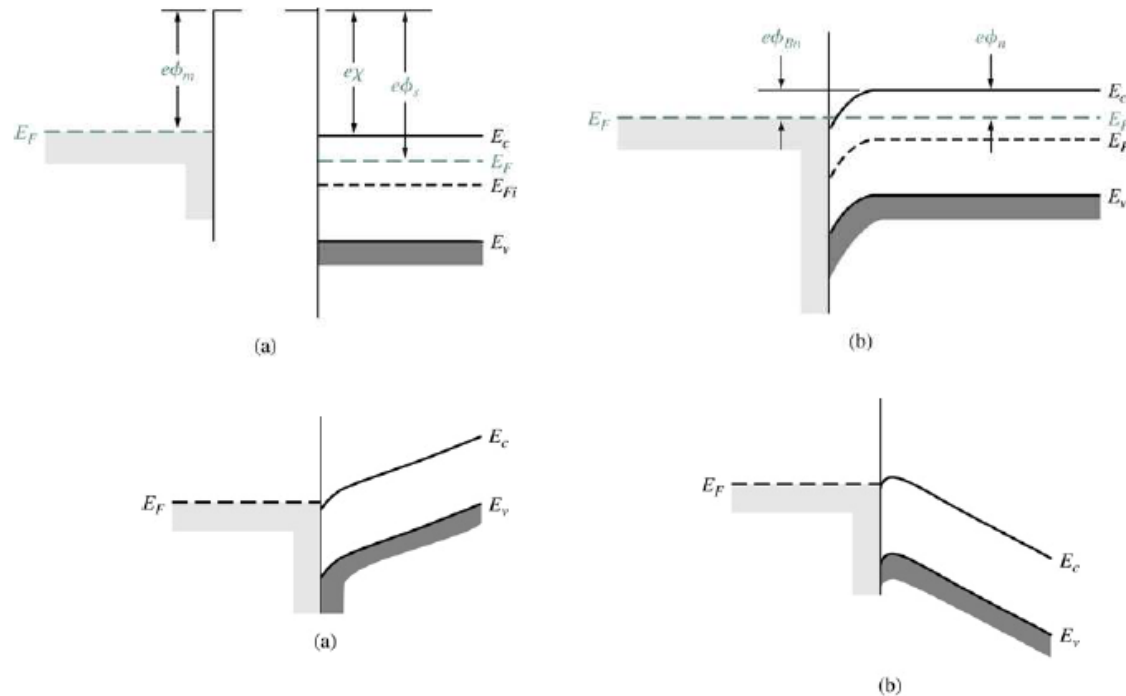
$$W = \left[\frac{2\epsilon(V_{bi} + V_R)}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}$$

$$C' = \left[\frac{e\epsilon}{2(V_{bi} + V_R)} \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2}$$

for N_a (metal) $\gg N_d$ since metal is full of free charges. (half filled band, has both electrons and holes), therefore:

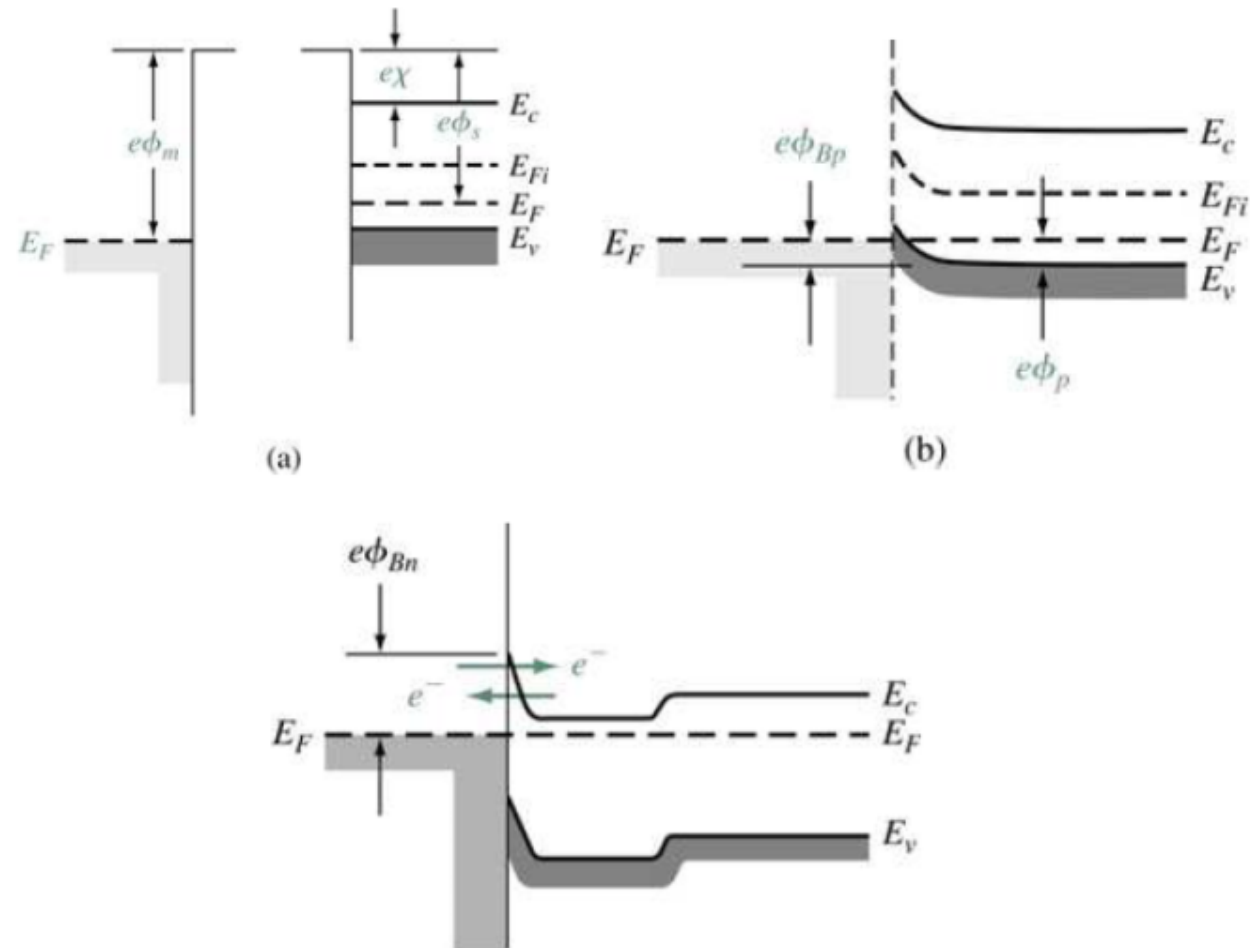
$$x_n = \left[\frac{2\epsilon}{eN_d} (V_{bi} + V_R) \right]^{1/2} \quad C' = \left[\frac{e\epsilon N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right]^{1/2}$$

Metal-Semiconductor Ohmic Contacts: n-type

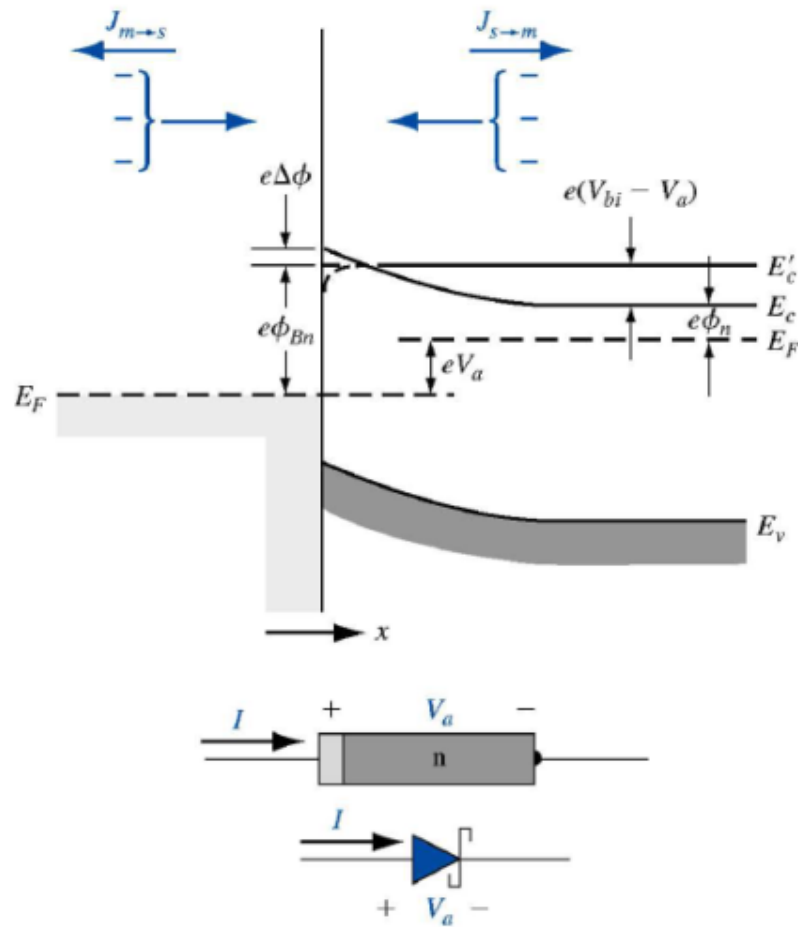


- if metal and semiconductor's work function is close enough and the semiconductor has enough carriers to conduct, an Ohmic contact that conducts currents bi-directionally can be formed

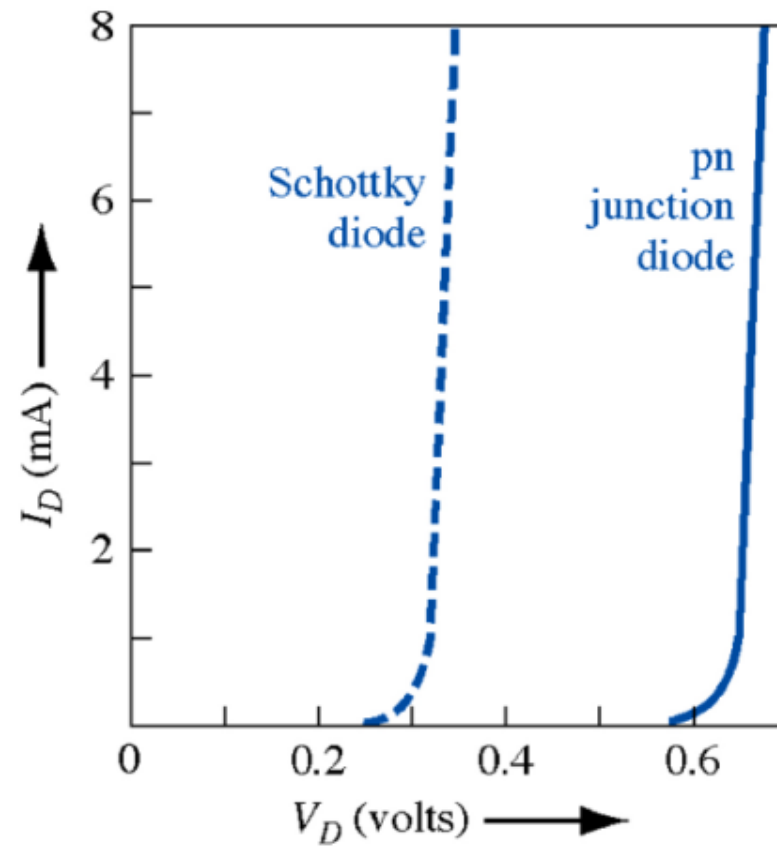
Metal-Semiconductor Ohmic Contacts: p-type and tunneling Ohmic contacts



Schottky Junction: forward bias



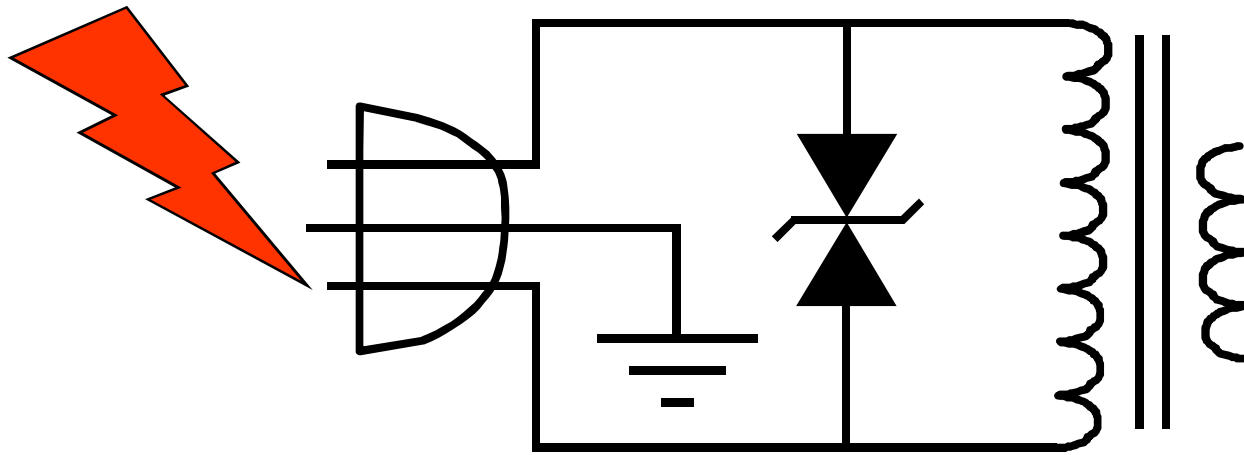
$$J = J_{ST} \left[\exp\left(\frac{V_D}{V_t}\right) - 1 \right]$$



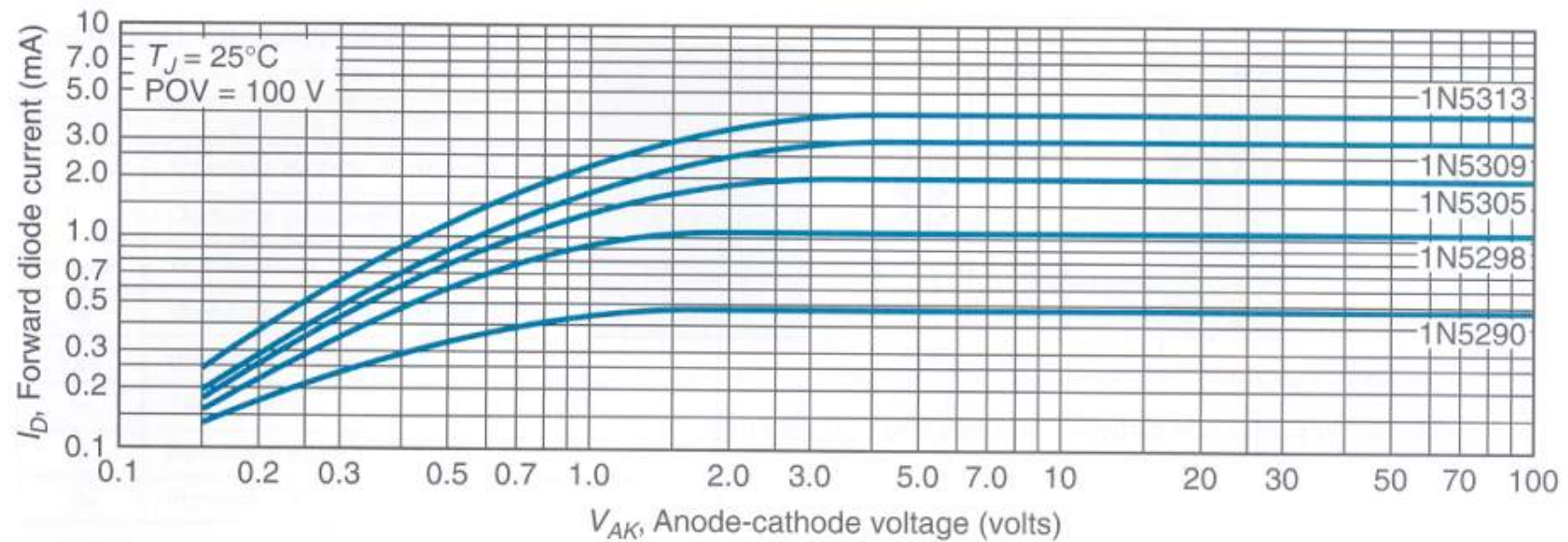
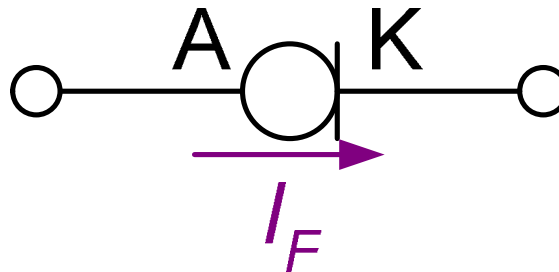
Các diode khác

- **Varistor** (bộ triệt quá độ): hạn biên bảo vệ tải.
- **Diode ổn dòng (Current-regulator diode)**
- **Diode hồi phục bước**: có dòng ở phân cực ngược và thay đổi đột ngột về 0 với áp ngược thích hợp → tạo hài, tạo sóng
- **Diode ngược**: đánh thủng ngược ở điện áp thấp gần 0V ($\sim 0.1V$) → chỉnh lưu tín hiệu AC thấp (yếu) (**ngược**: do dẫn ngược tốt hơn dẫn thuận!)
- **Diode tunnel** (đường hầm): đặc tuyến có vùng điện trở âm → tạo dao động.

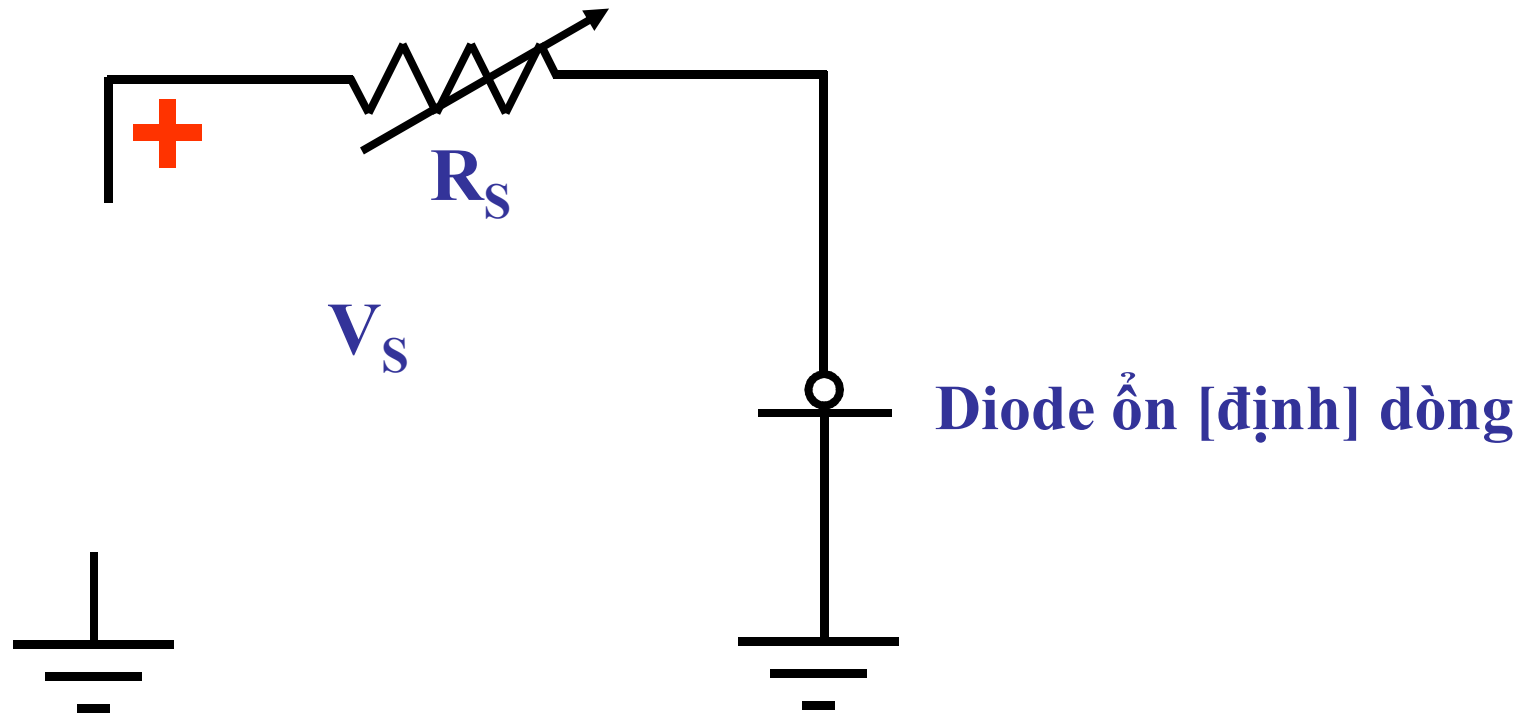
“varistor diode” có thể được dùng để bảo vệ thiết bị điện không bị hư khi có đột biến điện áp.



Diode ổn [định] dòng [điện] (Constant-Current Diode)

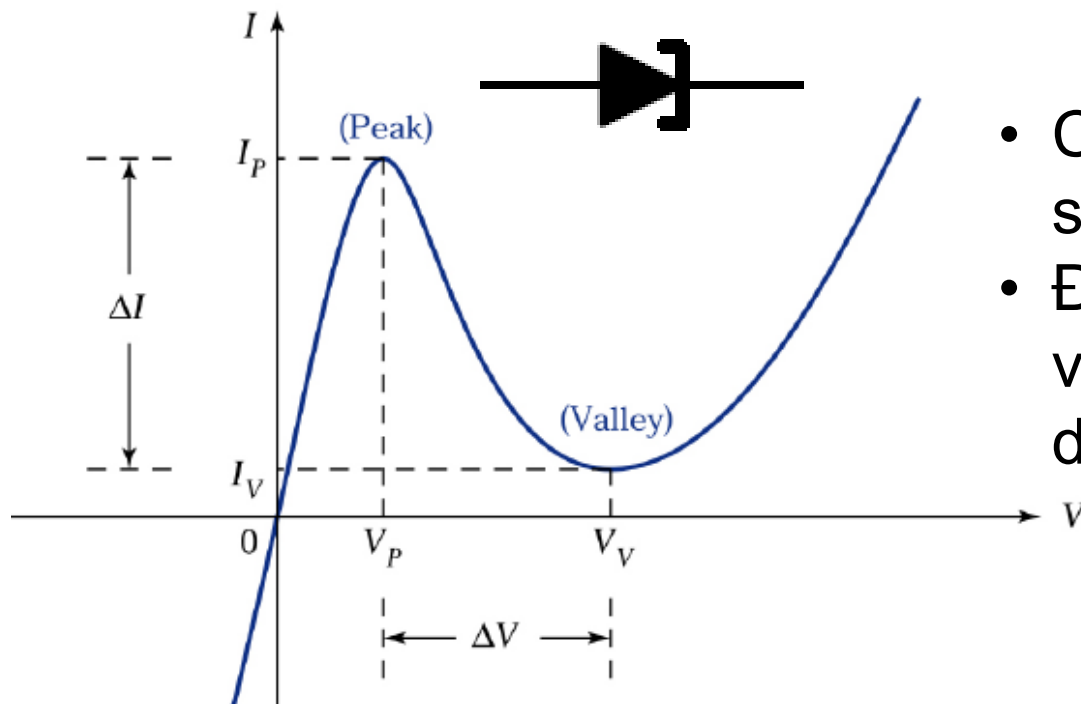
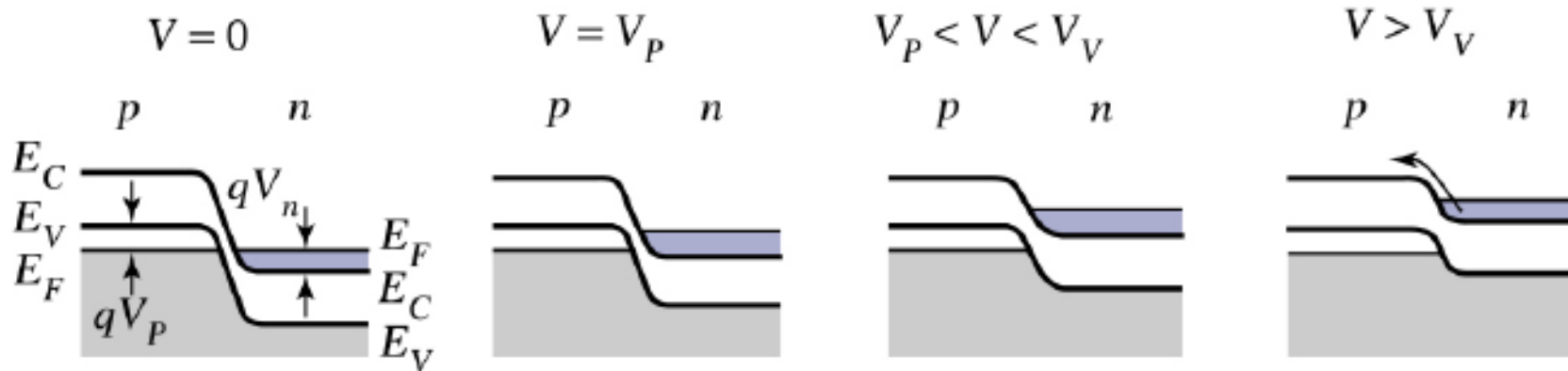


Diode ổn dòng (2)



R_S có thể thay đổi và dòng điện giữ không đổi.

Diode đường hầm (Tunnel diode)



- Chuyển tiếp PN với bán dẫn suy biến
- Đặc tuyến I-V cho thấy có vùng **điện trở âm**, được dùng trong mạch dao động

Tunnel Diodes

Tank circuits oscillate but “die out” due to the internal resistance. A tunnel diode will provide “negative resistance” that overcomes the losses and maintains the oscillations.

