

## CÁC LINH KIỆN BÁN DẪN CÔNG SUẤT

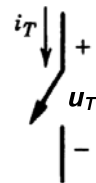
61

### Giới thiệu về bán dẫn công suất

Linh kiện bán dẫn điện tử công suất chỉ hoạt động ở hai chế độ: dẫn (ON) và tắt (OFF). Do đó, chúng còn được gọi là khoá bán dẫn (power switch).

Với khoá bán dẫn lý tưởng:

- Ở chế độ dẫn:  $u_T = 0 \rightarrow$  Tổn hao trên khoá bán dẫn  $p_T = u_T \cdot i_T = 0$ ,
- Ở chế độ tắt:  $i_T = 0 \rightarrow$  Tổn hao trên khoá bán dẫn  $p_T = u_T \cdot i_T = 0$ .



Những yêu cầu của một linh kiện bán dẫn điện tử công suất:

- Không có tổn hao khi dẫn
- Không có tổn hao khi tắt
- Không có tổn hao khi chuyển mạch (tắt  $\rightarrow$  dẫn hoặc dẫn  $\rightarrow$  tắt)
- Công suất điều khiển nhỏ
- Thời gian chuyển mạch (turn-on time, turn-off time) thấp
- Điện áp, dòng điện định mức phù hợp với ứng dụng
- Có thể dẫn dòng một chiều / hai chiều

62

## Giới thiệu về bán dẫn công suất

Phân loại linh kiện bán dẫn theo khả năng điều khiển:

- Linh kiện không điều khiển: quá trình chỉ chuyển mạch phụ thuộc nguồn cung cấp, ví dụ: diode, diac...
- Linh kiện chỉ kích dẫn được, không có khả năng kích tắt, ví dụ: SCR, triac.
- Linh kiện có khả năng kích dẫn và kích tắt (Self-commutated device), ví dụ: transistor, GTO (Gate Turn-off Thyristor), IGCT...

Những thông số quan trọng của linh kiện bán dẫn ĐTCS:

- Điện áp đánh thủng (breakdown voltage) cao
- Điện trở dẫn (ON resistance) thấp
- Thời gian chuyển mạch thấp

Tuy nhiên, các thông số trên có ảnh hưởng đến nhau khi chế tạo linh kiện, không thể cải tiến thông số này mà không gây ảnh hưởng lên thông số khác.

63

## Giới thiệu về bán dẫn công suất

Các linh kiện làm việc trên nguyên lý hạt tải đa số (majority carrier) như MOSFET, Schottky diode có điện áp đánh thủng không cao để điện trở dẫn ở mức chấp nhận được, đổi lại, linh kiện có thời gian chuyển mạch thấp.

Các linh kiện làm việc trên nguyên lý hạt tải thiểu số (minority carrier) như transistor, SCR, GTO, v.v... có điện trở dẫn thấp và có thể chế tạo với điện áp đánh thủng cao. Tuy nhiên, chúng cần thời gian chuyển mạch lớn hơn nhiều so với linh kiện làm việc theo nguyên lý hạt tải đa số nói trên, vì cần thời gian để bơm hoặc rút các hạt tải thiểu số vào vùng không hạt tải (depletion layer) tương ứng với việc điều khiển dẫn hoặc tắt linh kiện.

64

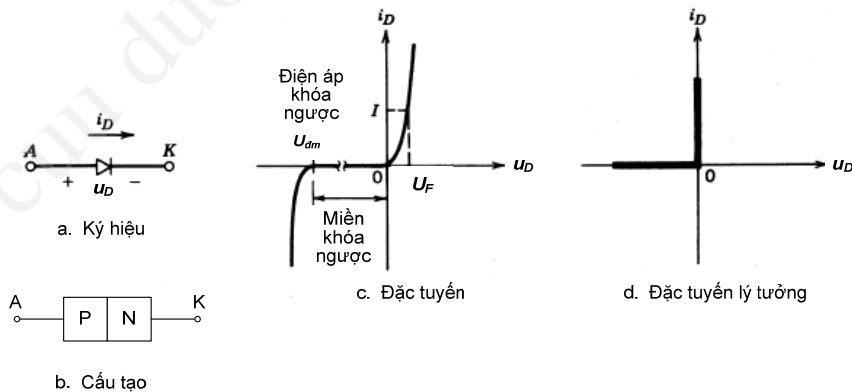
## Diode

### Diode công suất:

- Là linh kiện đơn giản nhất nhưng cũng quan trọng nhất của điện tử công suất.
- Diode dẫn (ON) khi được phân cực thuận. Sụt áp (voltage drop) trên diode khi dẫn khoảng 1V. Diode sẽ tắt (OFF) khi bị phân cực ngược, trong thực tế sẽ có dòng rò (leakage current) rất nhỏ qua diode theo chiều ngược. Điện áp ngược vượt quá giá trị breakdown voltage sẽ đánh thủng và phá hủy diode do hiệu ứng thác (avalanche effect).
- Có thể phân thành 3 loại:
  - Loại lưỡng cực: bao gồm loại diode dùng trong mạch chỉnh lưu tần số lưới (50/60Hz) và loại đóng cắt nhanh (fast recovery diode) dùng trong các bộ biến đổi công suất hoặc mạch snubber,
  - Loại Schottky diode: tần số hoạt động cao, điện áp bão hoà thấp ( $0.3V \rightarrow 0.5V$ ), tuy nhiên chỉ có thể chế tạo với điện áp làm việc thấp, dùng trong các bộ biến đổi hoạt động với tần số cao.
- Diode loại lưỡng cực có thể chế tạo với điện áp và dòng làm việc lớn: có dòng định mức lên tới hơn 5000A, điện áp định mức lên đến 10kV hoặc hơn nữa.

65

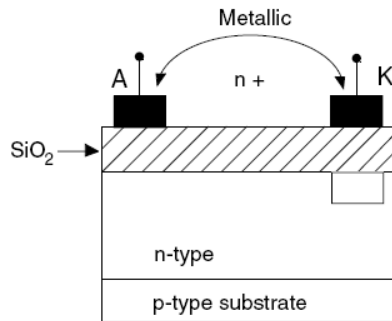
## Diode



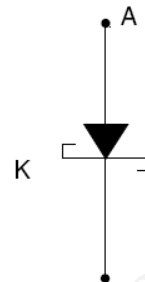
### Diode lưỡng cực

66

## Diode



a. Cấu trúc



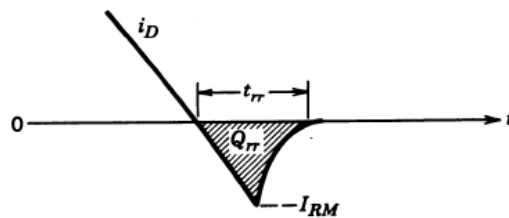
b. Ký hiệu

## Diode Schottky

67

## Diode

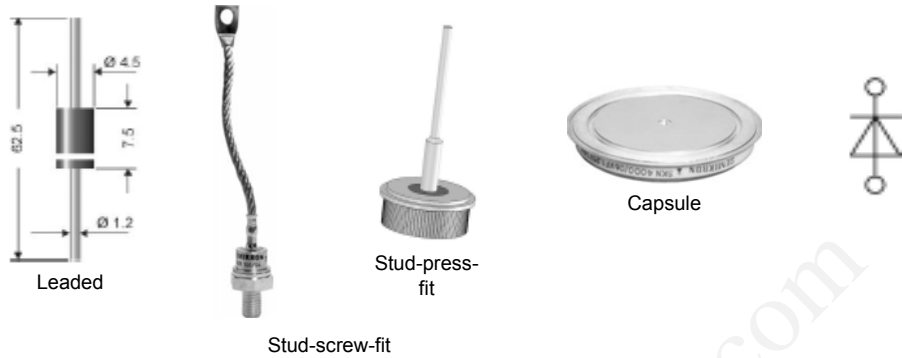
- $Q_{rr}$ : recovery charge – diện tích cần nạp lại trên lớp tiếp giáp p-n của diode để phục hồi tính chất khoá của diode.
- $t_{rr}$ : recovery time - thời gian phục hồi tính chất khoá của diode. Dòng qua diode trong thời gian này là dòng chuyển mạch (hoặc dòng phục hồi của diode).



Đặc tính chuyển mạch của diode

68

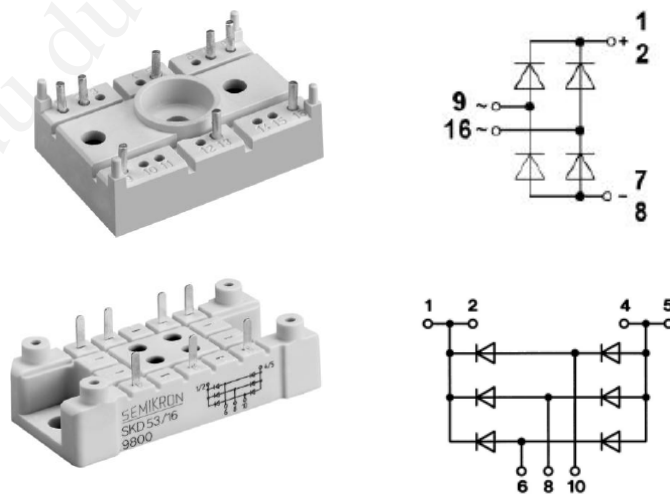
## Diode



Các dạng diode thực tế

69

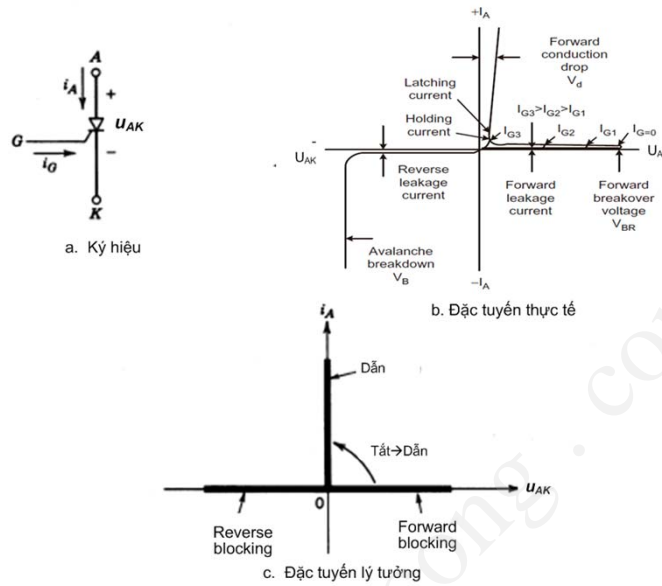
## Diode



Cầu chỉnh lưu diode

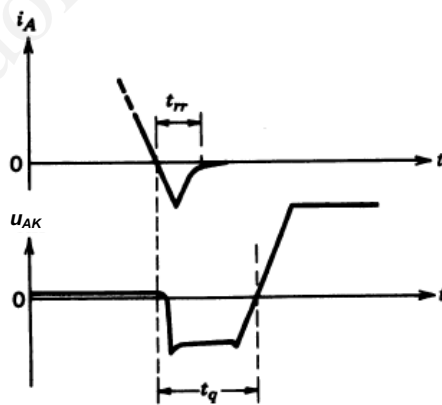
70

## Thyristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier)



71

## Thyristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier)



Đặc tính của SCR khi tắt

Lưu ý: áp ngược cần duy trì trong khoảng thời gian  $> t_q$  để đảm bảo SCR hồi phục tính chất khoá

72

### Thyristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier)

Đặc tính:

- Thyristor sẽ dẫn như khi được phân cực thuận và có xung dòng điện ngắn đưa vào cực G (gate). Sau đó, thyristor sẽ tiếp tục trạng thái dẫn mà không cần xung kích nữa khi dòng qua thyristor  $I_A >$  dòng cài (latching current)  $\rightarrow$  không thể kích tắt thyristor bằng cách đưa xung dòng vào cực G.
- Thyristor đang dẫn sẽ chuyển sang trạng thái tắt khi bị phân cực ngược hoặc dòng qua thyristor  $I_A <$  dòng giữ (holding current).
- Điện áp  $U_{AK}$  khi SCR dẫn khoảng 1-2 Volts, xung dòng kích vào cực G cỡ vài mA đến vài trăm mA.
- Ngoài ra, thyristor có thể dẫn mà không cần xung kích vào cực G khi điện áp  $U_{AK}$  có  $dv/dt$  cao quá mức cho phép của thyristor, hoặc thyristor được phân cực thuận với điện áp lớn hơn mức cho phép (forward breakover voltage -  $V_{BR}$ ). Thyristor cũng có thể được kích dẫn khi lớp tiếp giáp (junction) được chiếu sáng (Light SCR).
- Thyristor sẽ bị đánh thủng do hiệu ứng thác (tương tự như diode) nếu điện áp phân cực ngược vượt qua mức cho phép (avalanche breakdown voltage -  $V_B$ ).

73

### Thyristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier)

Đặc tính (t-t):

- Thyristor có khả năng chịu dòng quá tải lớn trong một thời gian ngắn  $\rightarrow$  có thể bảo vệ thyristor bằng cách mắc nối tiếp với cầu chì cắt nhanh (fast fuse).
- Thời gian tắt (turn-off time) từ vài  $\mu s$  đến 200  $\mu s$ .
- Được chế tạo với dòng định mức từ 10A tới 5000A, và điện áp định mức từ 200V tới 6kV hoặc cao hơn.

Ứng dụng:

- Điều khiển pha ( $AC \rightarrow DC$ ,  $AC \rightarrow AC$ )
- Nghịch lưu ( $DC \rightarrow AC$ )
- Contact bán dẫn (Static switch)

74

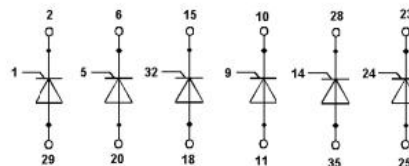
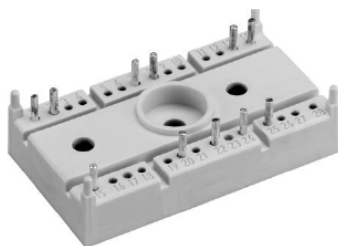
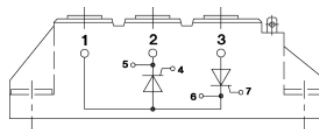
### Thyristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier)



Các dạng thyristor thực tế

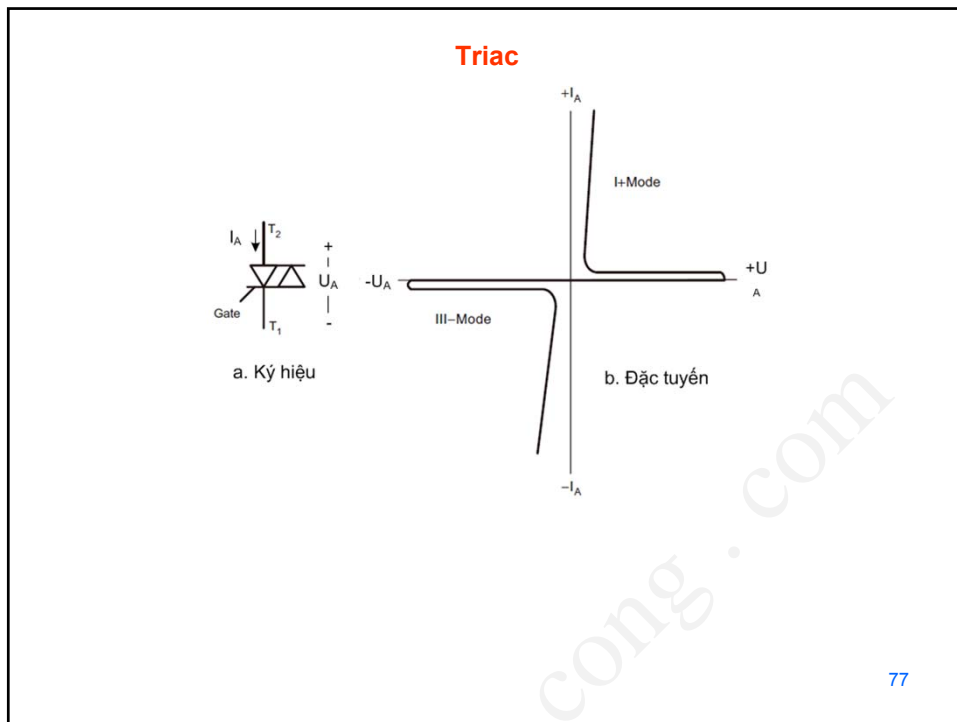
75

### Thyristor (SCR - Silicon Controlled Rectifier)



Các dạng thyristor thực tế

76



### Triac

**Đặc tính:**

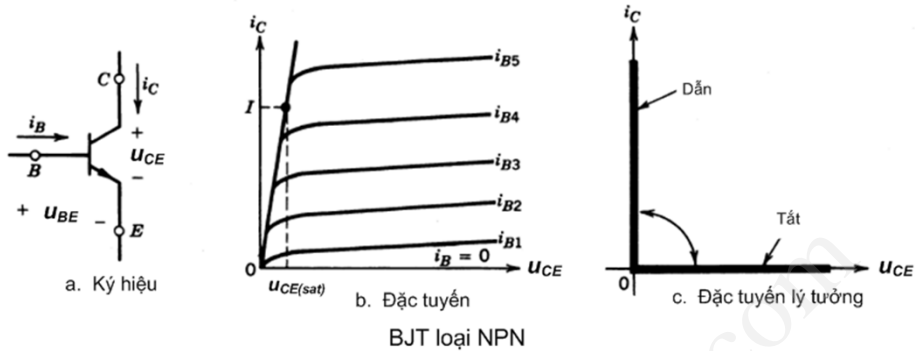
- Triac là linh kiện bán dẫn công suất 3 cực, có cấu trúc giống như hai SCR mắc song song ngược nhưng được điều khiển bởi một cực G (gate). Trong mode I+, cực T<sub>1</sub> dương hơn T<sub>2</sub> và GTO được kích bằng xung dòng *dương* vào cực G. Trong mode III-, cực T<sub>1</sub> âm hơn T<sub>2</sub> và GTO được kích bằng xung dòng *âm* vào cực G.
- Khả năng chịu  $dv/dt$  kém hơn thyristor → thường cần mạch đệm (snubber) R-C mắc giữa hai cực T<sub>1</sub> và T<sub>2</sub>, đặc biệt khi dùng với tải có tính cảm kháng.
- Thời gian tắt (turn-off time) lớn hơn SCR.
- Chế tạo với dòng định mức từ 2A đến 50A và áp định mức từ 200V đến 800V.

**Ứng dụng:**

- Được sử dụng nhiều trong các mạch điều khiển điện áp xoay chiều một pha cỡ nhỏ cho các ứng dụng như điều khiển độ sáng đèn (light dimmer), điều khiển công suất cho các dụng cụ cầm tay hoặc thiết bị gia dụng.

78

## BJT (Bipolar Junction Transistor)



79

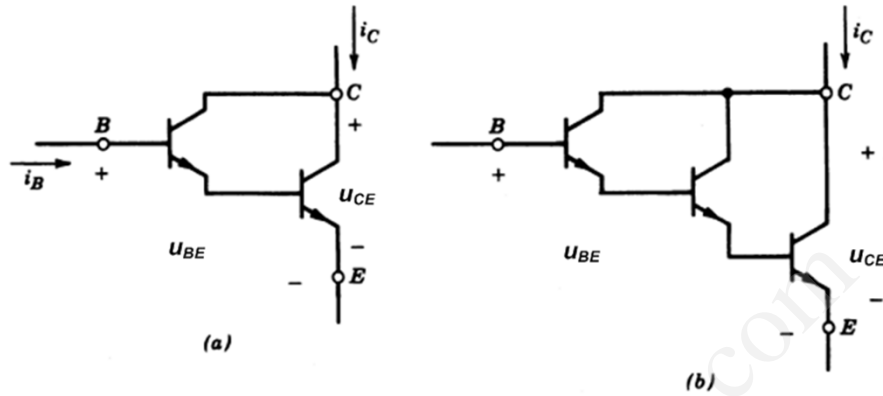
## BJT (Bipolar Junction Transistor)

### Transistor lưỡng cực (Bipolar Junction Transistor - BJT)

- Điều khiển bằng dòng  $i_B$  vào cực B (base).
- BJT dẫn (nghĩa là ở trạng thái dẫn bão hòa - saturation) khi được phân cực thuận và cung cấp đủ dòng vào cực B (Base) sao cho:  $\beta I_B > I_C$ . Lưu ý là  $\beta < 10$  với BJT công suất lớn  $\rightarrow$  cần công suất điều khiển lớn. Điện áp bão hòa ( $U_{CE,sat}$ ) cỡ 0.5-2.5 Volts.
- BJT tắt khi  $i_B = 0$  ( $U_{BE} = 0V$ ). Tuy nhiên, để tắt nhanh BJT, thường cung cấp một điện áp âm nhỏ (khoảng -5V) giữa hai cực B-E.
- Được chế tạo với dòng định mức từ 0.5A đến 500A (hoặc cao hơn) và điện áp từ 30 đến 1200V. Lưu ý: transistor thường không thể chịu đựng điện áp ngược lớn hơn khoảng vài chục Volts, nên không được phân cực ngược transistor.
- Để tăng hệ số khuếch đại dòng ( $\rightarrow$  giảm dòng kích  $i_B$ ) có thể dùng transistor ghép kiểu Darlington. Tuy nhiên, transistor Darlington có  $U_{CE,sat}$  lớn hơn transistor đơn có cùng công suất  $\rightarrow$  tổn hao nhiều hơn và tần số đóng ngắt thấp.
- Thời gian tắt ( $t_{off}$ ) từ 0.5  $\mu s$  đến 100 $\mu s$ .
- Ứng dụng trong các bộ biến đổi dc-dc hoặc dc-ac. Tuy nhiên, BJT hiện được thay thế bởi MOSFET (trong ứng dụng công suất thấp) và IGBT (trong ứng dụng công suất cao).

80

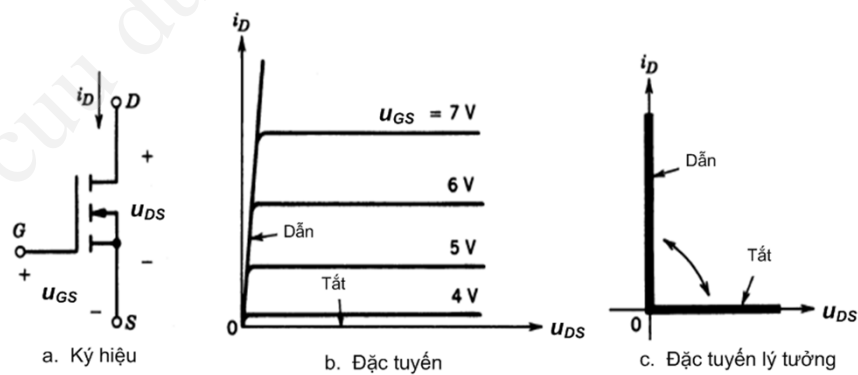
## BJT (Bipolar Junction Transistor)



Transistor ghép Darlington

81

## MOSFET



MOSFET kênh N

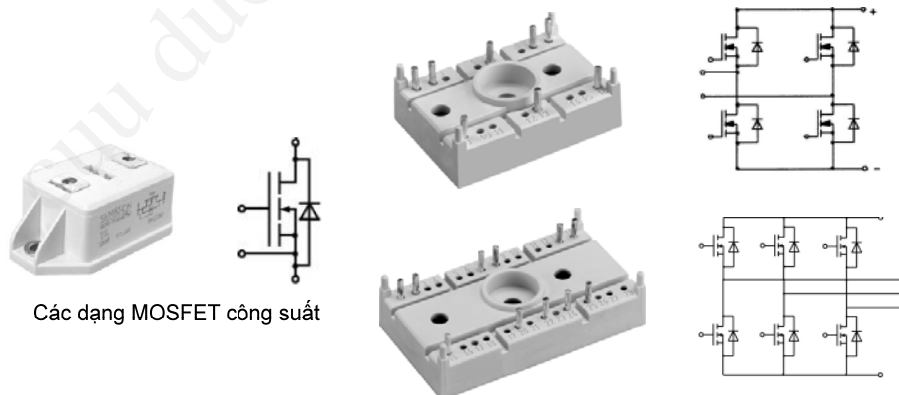
82

## MOSFET

- Điều khiển bằng điện áp  $U_{GS}$ : dòng vào rất bé  $\rightarrow$  Công suất điều khiển thấp. Thông thường, điện áp điều khiển cần thiết để MOSFET dẫn bão hòa:  $U_{GS}$  cỡ 5 $\rightarrow$ 20V. MOSFET sẽ tắt khi  $U_{GS} < U_{GS \text{ threshold}}$  (cỡ 4 đến 5V).
- Khi MOSFET dẫn bão hòa, giữa 2 cực D và S tương đương với một điện trở  $R_{DS(ON)}$ , và đây cũng là thông số quan trọng của MOSFET. Lưu ý là  $R_{DS(ON)}$  tăng nhanh theo điện áp  $U_{DS}$  định mức (rating) của MOSFET và có hệ số nhiệt dương, nghĩa là  $R_{DS(ON)}$  tăng theo nhiệt độ của MOSFET.
- Có thể đóng cắt rất nhanh do thời gian chuyển mạch thấp:  $t_{off} \approx 50\text{ns} - 200\text{ns}$ . Do đó, MOSFET được sử dụng trong những ứng dụng hoạt động với điện áp thấp (vài chục  $\rightarrow$  vài trăm Volts), tần số cao (đến 100kHz hoặc cao hơn).
- Thường được chế tạo với diode ngược tích hợp sẵn trong MOSFET. Tuy nhiên, diode này có thời gian phục hồi  $t_{rr}$  cao, nên cần sử dụng thêm diode đóng cắt nhanh với các ứng dụng có tần số làm việc cao.
- Chế tạo với dòng định mức trong khoảng 0.5 đến 200A và điện áp từ 20V đến 1000V.
- Có thể nối song song các MOSFET dễ dàng để tăng công suất của mạch.
- Thường sử dụng trong các bộ biến đổi dc-dc hoặc dc-ac đóng ngắt với tần số cao: như các bộ nguồn kiểu đóng ngắt (switching power supply), nguồn cho các thiết bị cầm tay, hoặc các ứng dụng trên xe máy hoặc xe hơi.

83

## MOSFET

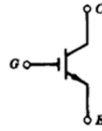


Các dạng MOSFET công suất

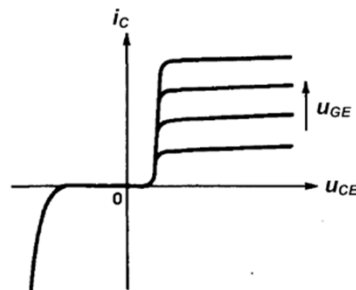
Các dạng MOSFET công suất

84

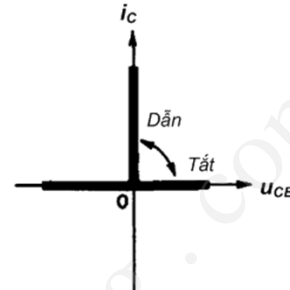
### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



a. Ký hiệu



b. Đặc tuyến



c. Đặc tuyến lý tưởng

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

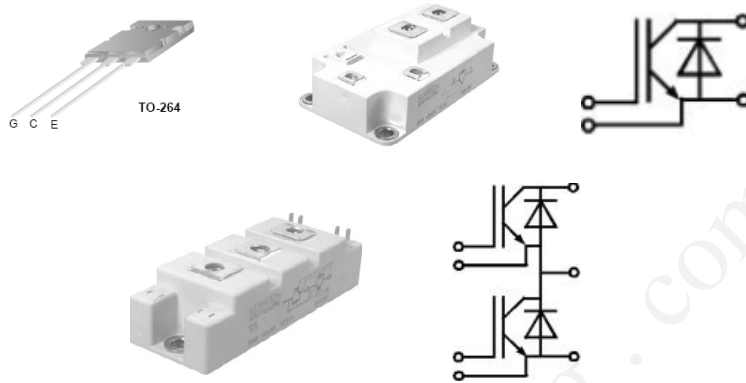
85

### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

- Có thể xem là sự kết hợp giữa MOSFET và BJT, điều khiển ON/OFF bằng cách đặt điện áp giữa 2 cực G và E ( $U_{GE}$ ).
- IGBT là linh kiện không có khả năng chịu điện áp ngược (asymmetric voltage blocking). Tuy nhiên, gần đây đã xuất hiện loại IGBT có khả năng chịu áp (symmetric voltage blocking), có thể dùng trong các ứng dụng với bộ biến đổi kiểu nguồn dòng.
- Điện áp giữa C-E khi IGBT dẫn bão hòa:  $U_{CE, sat} \approx 2-3V$
- Thời gian tắt:  $t_{off}$  cỡ vài trăm ns  $\rightarrow 1\mu s$
- Hiện được chế tạo với công suất lên đến 4.5kV/1000A hoặc 6.5kV/700A. IGBT với điện áp lên đến 10kV có thể ra mắt trong tương lai gần (đang thử nghiệm).
- Là loại linh kiện điện tử công suất được dùng rộng rãi nhất hiện nay với các ứng dụng từ vài trăm Watt đến vài MW.

86

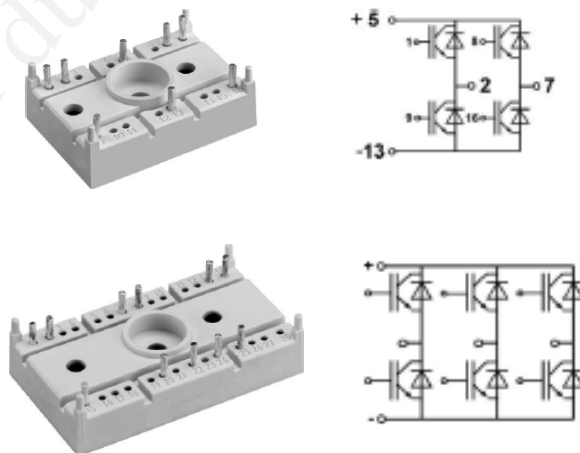
### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



Các dạng IGBT công suất

87

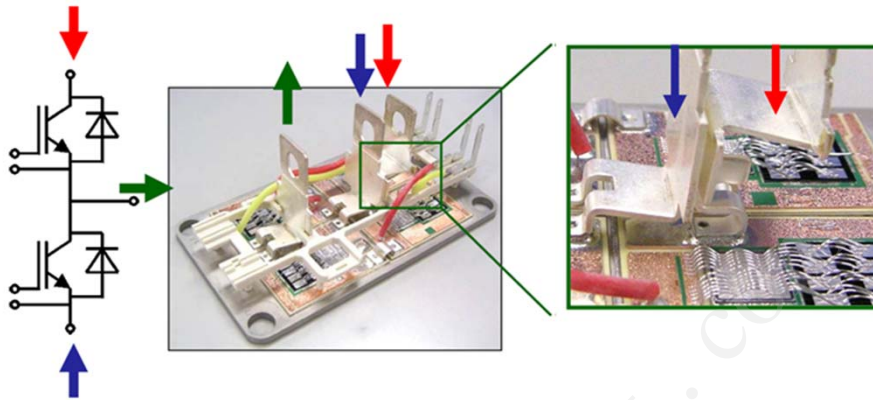
### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



Các dạng IGBT công suất

88

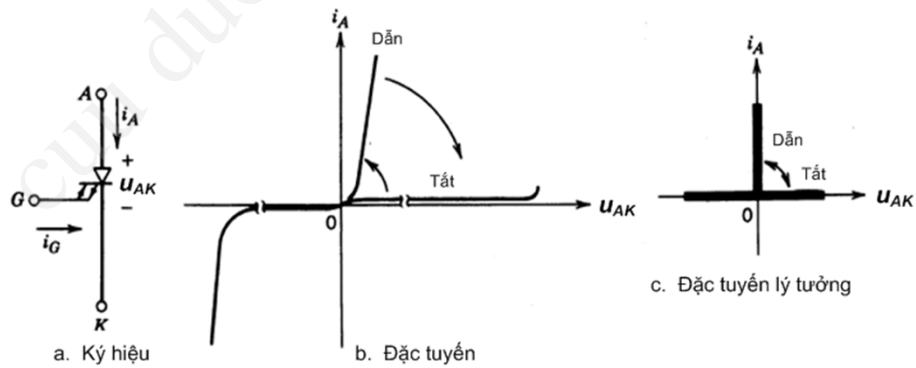
### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



Cấu trúc thực tế bên trong một module IGBT

89

### GTO (Gate Turn-Off Thyristor)



GTO (Gate-Turn Off Thyristor)

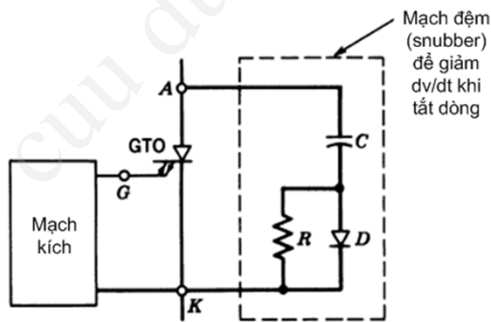
90

### GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

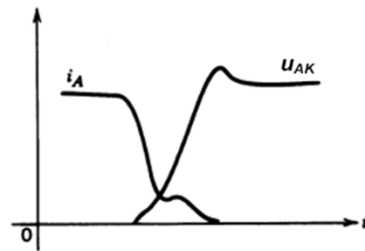
- Điều khiển ON hoặc OFF bằng cách đưa xung dòng vào cực G,
- Giống như thyristor, GTO được kích dẫn bằng cách đưa một xung dòng dương vào cực G, và sau khi ở trạng thái dẫn, GTO có thể duy trì trạng thái này mà không cần dòng kích vào cực G nữa.
- Khác với thyristor, GTO có thể kích tắt bằng cách đưa xung dòng âm đủ lớn vào cực G (bằng cách đặt  $U_{GK} < 0$ ). Xung dòng này chỉ cần duy trì trong khoảng thời gian cần thiết để tắt GTO ( $t_q$ ), tuy nhiên, dòng này cần có giá trị cỡ 1/4 đến 1/5 lần dòng  $I_A$  qua GTO trước khi tắt.
- Khả năng chịu  $dv/dt$  thấp  $\rightarrow$  thường cần mạch snubber  $\rightarrow$  tổn hao trên điện trở của mạch snubber.
- Được chế tạo với hai loại: asymmetric voltage blocking (khả năng chịu điện áp ngược thấp) dùng cho cầu hình bộ biến đổi kiểu nguồn áp (voltage source converter), và symmetric voltage blocking (khả năng chịu điện áp ngược cao) dùng cho cầu hình bộ biến đổi kiểu nguồn dòng (current source converter).
- Có thể chế tạo với công suất lớn nhất khoảng 6kV, 6kA, tần số đóng cắt trong các ứng dụng thường trong khoảng vài trăm Hz đến 1kHz.
- Có thể được thay thế bởi các linh kiện khác như IGCT trong tương lai.

91

### GTO (Gate Turn-Off Thyristor)



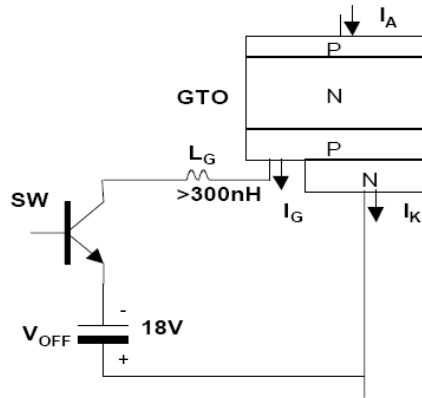
a. GTO và mạch đệm



b. Chuyển trạng thái dẫn  $\rightarrow$  tắt của GTO

92

## GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

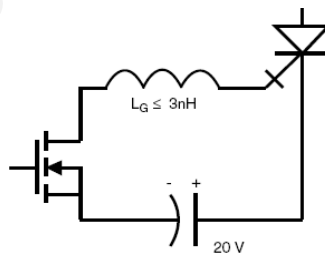


GTO thực tế với dây dẫn để đưa xung kích vào cực G - K

GTO với mạch kích tắt điển hình

93

## IGCT / GCT



Mạch tương đương của IGCT / GCT

- Sự cải tiến công nghệ GTO đưa đến phát minh các linh kiện mới trong đó tích hợp mạch kích (driver) với linh kiện nhằm làm tăng tốc độ đóng cắt và giảm công suất điều khiển. Do đó, các linh kiện này chuyển mạch nhanh hơn và dễ sử dụng hơn GTO truyền thống.
- Tên gọi: GCT (Gate Controlled Thyristor – phát triển bởi Mitsusbishi) và IGCT (Integrated Gate Controlled Thyristor - phát triển bởi ABB).

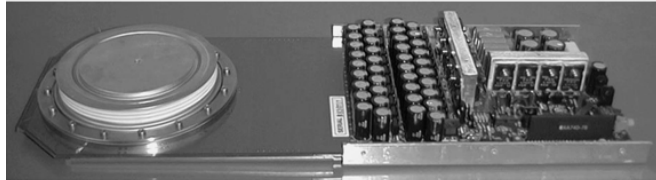
94

## IGCT / GCT

GCT

LG<3

Driver



Mitsubishi 4kA / 4.5 kV GCT

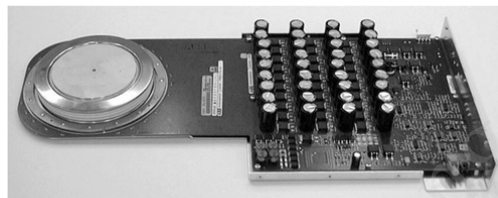


ABB 4 kA / 4.5 kV IGCT

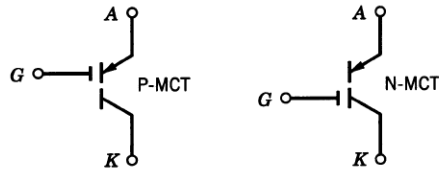
95

## IGCT / GCT

- Để tắt IGCT, cần đưa vào cực G của linh kiện một xung dòng âm *gần bằng* với dòng qua GTO trước khi tắt. Xung dòng này (có  $di/dt$  lên tới khoảng  $4\text{kA}/\mu\text{s}$ ) được tạo ra trong mạch kích bao gồm nhiều MOSFET mắc song song và có điện cảm rất thấp.
- Có điện áp khi dẫn (conduction drop voltage) thấp hơn IGBT cùng công suất.
- Không cần sử dụng mạch snubber do có thời gian tắt nhanh. Tần số đóng cắt thường sử dụng: khoảng 1kHz
- Có thể chế tạo theo hai kiểu: asymmetric voltage blocking (khả năng chịu điện áp ngược thấp) và symmetric voltage blocking (khả năng chịu điện áp ngược cao). Loại asymmetric voltage hiện chế tạo lên đến  $6.5\text{kV}/3\text{kA}$  hoặc  $4.5\text{kV}/4\text{kA}$ . Loại symmetric voltage chế tạo với định mức thấp hơn, khoảng  $6\text{kV}/800\text{A}$ .
- Ứng dụng trong các bộ biến đổi đa bậc (multilevel converter) dùng trong truyền tải điện với công suất lên đến nhiều MVA.

96

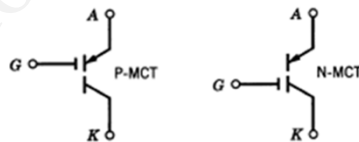
### MCT (MOS-Controlled Thyristor)



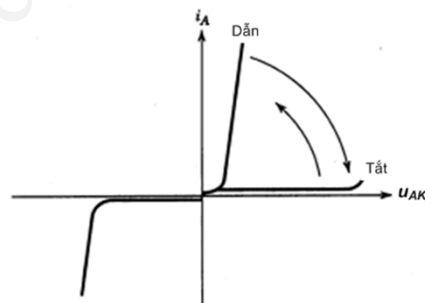
Kích dẫn **MCT kênh p**: đưa xung **âm** vào cực G-A  
 Kích dẫn **MCT kênh n**: đưa xung **dương** vào cực G-K  
 Kích tắt **MCT kênh p**: đưa xung **dương** vào cực G-A  
 Kích tắt **MCT kênh n**: đưa xung **âm** vào cực G-K

97

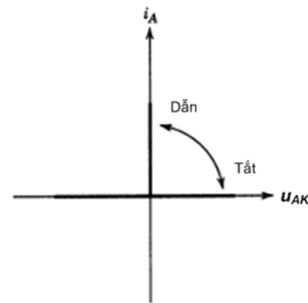
### MCT (MOS-Controlled Thyristor)



a. Ký hiệu



b. Đặc tuyến



c. Đặc tuyến lý tưởng

98

### MCT (MOS-Controlled Thyristor)

- So với GTO, MCT đóng ngắt đơn giản hơn và với công suất thấp hơn, ngoài ra tốc độ đóng cắt của MCT nhanh hơn so với GTO (thời gian  $t_{on}$  và  $t_{off}$  chỉ cỡ vài  $\mu s$ )
- MCT có điện áp  $U_{AK(ON)}$  nhỏ hơn điện áp  $U_{CE,sat}$  của IGBT.
- Hiện có thể chế tạo với điện áp cỡ 1500V, dòng điện từ 50A đến vài trăm A. Trong tương lai gần, linh kiện với điện áp lên đến 3000V đang được chế tạo. Tuy nhiên, MCT khó có thể chế tạo với dòng lớn như GTO vì do cấu trúc khá phức tạp, nên không thể chế tạo với tiết diện bán dẫn lớn như GTO.

99

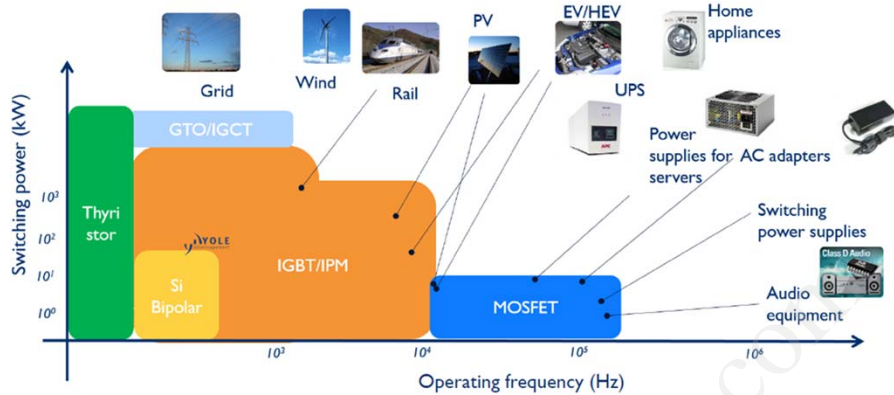
### Intelligent Power Module (IPM)

- Là sự tích hợp các mạch công suất (power), điều khiển (control) và bảo vệ (protection) trong cùng một module, giúp việc thiết kế và chế tạo dễ dàng hơn, đồng thời giảm được kích thước mạch, giá thành và nhiễu điện từ (EMI – Electro-magnetic interference) cũng như tăng độ tin cậy của mạch.
- Có nhiều ứng dụng trong các bộ biến đổi DC-DC hoặc điều khiển động cơ các loại (step motor, động cơ cảm ứng 1 pha và 3 pha, v.v...)

100



## Công suất và tần số làm việc của các mạch ứng dụng ĐTCS



Source: "Status of the Power Electronics Industry 2018", YOLE Développement

103

## Sự phát triển của các chất bán dẫn mới

Hiện nay, Silicon là chất bán dẫn chủ yếu để chế tạo linh kiện điện tử công suất. Tuy nhiên, các loại chất bán dẫn mới như SiC hoặc kim cương (tổng hợp dưới dạng màng mỏng) đang được nghiên cứu ứng dụng.

Linh kiện với bán dẫn Silicon có thể chịu nhiệt tối đa lên tới  $175^{\circ}\text{C}$  (nhiệt độ mối nối bán dẫn – junction temperature), trong khi với SiC và kim cương, nhiệt độ này lần lượt là  $350^{\circ}\text{C}$  và  $600^{\circ}\text{C}$ . Điều này giúp làm giảm đáng kể kích thước linh kiện và yêu cầu tản nhiệt.

Hiện nay, một số linh kiện sử dụng bán dẫn SiC đã (hoặc sẽ) có mặt trên thị trường:

1. Schottky diode: 300-700V, 2-10A
2. Hybrid JFET (1.5kV, 12A)
3. BJT (1-10kV)
4. GTO (8-40kV)
5. MOSFET (0.2 – 6kV)

104