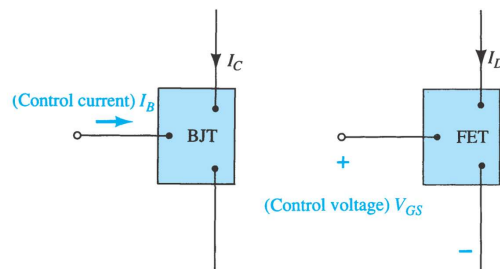


รู้จักตัวเอง

- “จริงรู้จัก ตัวเอง” คำนี้หมายถึง
- ว่าค้นพบ แก้วได้ ในตัวท่าน
- หานอกตัว ทำไม ให้ป่วยการ
- ดอกบัวบาน อยู่ในเรา อย่าเขลาไป
- ในดอกบัว มีมณี ที่เอกอุตม์
- เพื่อมนุษย์ ค้นหา มาให้ได้
- การตรัสรู้ หรือรู้ สิ่งใดใด
- ถ้วนมาจาก ความรู้ ตัวสูงเองๆ

FET vs BJT



Bipolar Transistor (BJT)		Field Effect Transistor (FET)
Emitter – (E)	>>	Source – (S)
Base – (B)	>>	Gate – (G)
Collector – (C)	>>	Drain – (D)

FET

FETs (Field-Effect Transistors) คล้ายกับ BJT (Bipolar Junction Transistors)

ข้อเหมือน

- ▶ ใช้ขยายสัญญาณ (Amplifiers)
- ▶ เป็นอุปกรณ์แบบเปิด-ปิด (Switching devices)
- ▶ ใช้เป็นวงจรจับคู่อิมพีแดนซ์ (Impedance matching circuits)

ข้อแตกต่าง

- ▶ FET = อุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (voltage controlled devices) BJT = อุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยกระแส (current controlled devices)
- ▶ FET มีอินพุตอิมพีแดนซ์ที่สูงกว่า BJT มีอัตราขยายที่สูงกว่า
- ▶ FET ไม่อ่อนไหวต่อการแปรผันของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากโครงสร้างทางกายภาพ + ง่ายต่อการสร้างเป็น IC

ชนิดของ FET

JFET -- Junction Field-Effect Transistor

MOSFET -- Metal-Oxide Semiconductor
Field-Effect Transistor

D-MOSFET -- Depletion MOSFET

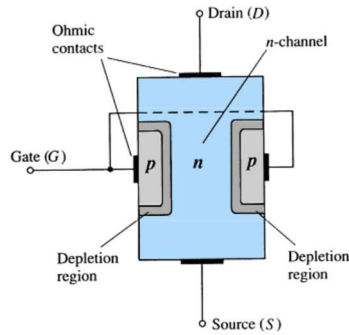
E-MOSFET -- Enhancement MOSFET

โครงสร้างของ JFET

JFET มี 2 ชนิด

- ▶ **n-channel** (นิยมใช้มากกว่า)
- ▶ **p-channel**

มี 3 ขา



- ▶ **Drain (D)** และ **source (S)** ต่อเข้ากับ n-channel
- ▶ **Gate (G)** ต่อเข้ากับส่วนที่เป็นวัสดุชนิด p-type

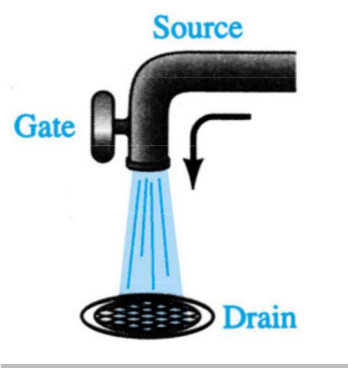
การใช้งานของ JFET

การใช้งาน JFET เปรียบได้กับการใช้ก๊อกน้ำ

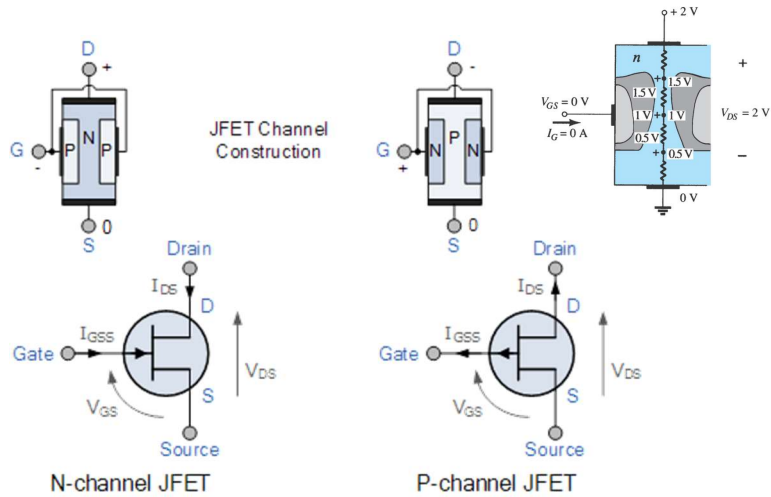
source (แหล่งจ่ายแรงดันน้ำ) เป็นที่สะสมของอิเล็กตรอนที่ขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดัน drain

drain การไหลของน้ำเปรียบได้กับการลดลงของอิเล็กตรอน (หรือโฮล) ที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดัน

control การควบคุมการไหลของน้ำด้วยประจุแรงดันซึ่งควบคุมความกว้างของ n-channel จึงเป็นการควบคุมการไหลของประจุจาก source ไปยัง drain



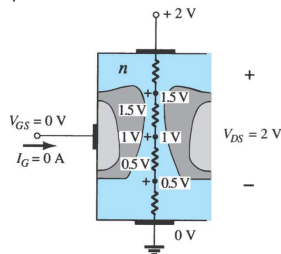
สัญลักษณ์ของ JFET



คุณลักษณะการทำงานของ JFET Operating Characteristics of JFET

JFET มีเงื่อนไขการทำงานอยู่ 3 แบบ:

- ▶ $V_{GS} = 0$, V_{DS} เพิ่มขึ้นค่าบวก
- ▶ $V_{GS} < 0$, V_{DS} คง ค่าบวก
- ▶ แรงดันควบคุมความต้านทาน (Voltage-controlled resistor)

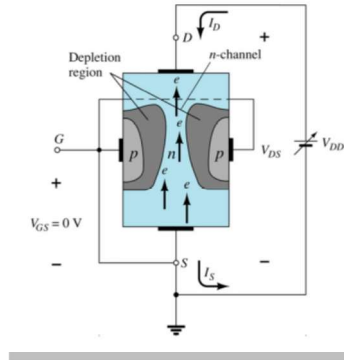


JFET Operating Characteristics

$V_{GS} = 0$, V_{DS} เพิ่มด้วยค่าบวก

มีเหตุการณ์ 3 อย่างเกิดขึ้นเมื่อ $V_{GS} = 0$ และ V_{DS} เพิ่มค่าจาก 0 ไปเป็นค่าบวกที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

- ▶ เขตปลอดพาหะระหว่าง p-gate และ n-channel เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจาก n-channel รวมตัวกับโฮลใน p-gate.
- ▶ เมื่อเขตปลอดพาหะเพิ่มขึ้น ขนาดของ n-channel จะแคบลง ทำให้ความต้านทานใน n-channel เพิ่มขึ้น
- ▶ ถึงแม้ความต้านทานของ n-channel จะเพิ่มขึ้น กระแส I_D จาก source ไปยัง drain ผ่านทาง n-channel ยังคงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก V_{DS} เพิ่มขึ้น

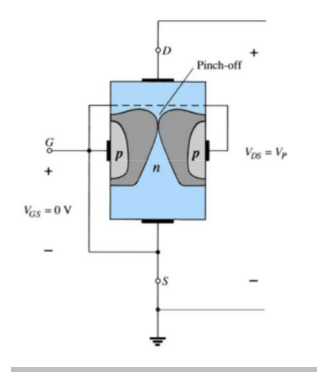


JFET Operating Characteristics

$V_{GS} = 0$, V_{DS} เพิ่มขึ้นจนถึงค่าบวกค่าหนึ่ง => Pinch Off

เมื่อ $V_{GS} = 0$ และ V_{DS} ยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเขตปลอดพาหะใหญ่พอที่ทั้งสองฟากของเขตปลอดพาหะมาบรรจบกัน เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ **pinches off** ของ n-channel.

ดูเหมือนว่ากระแสใน n-channel (I_D) น่าจะเป็น 0A แต่ I_D เพียงแค่ไม่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราเท่าเดิม (การเพิ่มของกระแสเริ่มน้อยลง)

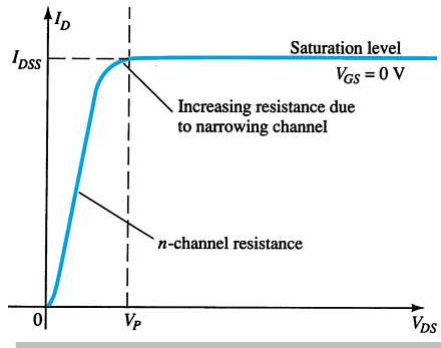


JFET Operating Characteristics

$V_{GS} = 0$, V_{DS} เพิ่มขึ้นด้วยค่าบวก => Saturation

ณ จุด pinch off

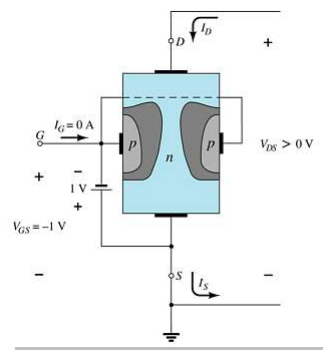
- ▶ V_{GS} ที่เพิ่มขึ้น จะไม่ทำให้ I_D เพิ่มขึ้นอีก ค่า V_{DS} ณ จุด pinch-off นี้เรียกว่า V_P
- ▶ I_D ณ จุดนี้เป็นค่าอิ่มตัวหรือ saturation ซึ่งจะมีค่าสูงที่สุด เรียกว่าเป็นกระแส I_{DSS}



JFET Operating Characteristics

$V_{GS} < 0$, V_{DS} ณ ค่าบวกค่าหนึ่ง

เมื่อ V_{GS} เป็นลบมากขึ้น เขตปลอดพาหะจะลดลง

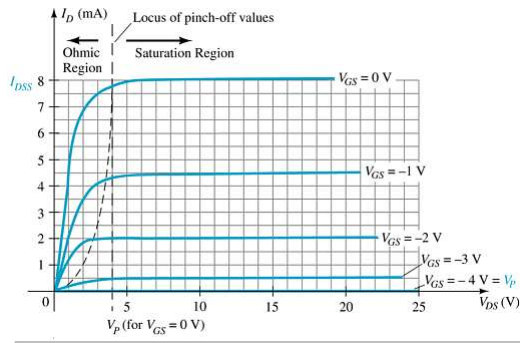


JFET Operating Characteristics

$V_{GS} < 0, V_{DS}$ ณ ค่าบวกค่าหนึ่ง $\Rightarrow I_D < I_{DSS}$

เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นลบมากขึ้น

- ▶ JFET จะเข้าสู่จุด pinch-off ด้วยค่าแรงดันที่ต่ำกว่า V_p
- ▶ I_D มีค่าลดลง ($I_D < I_{DSS}$) ถึงแม้ว่า V_{DS} จะเพิ่มขึ้น
- ▶ จนกระทั่ง I_D มีค่าเป็น 0A ค่า V_{GS} ณ จุดนี้เรียกว่า V_p หรือ $V_{GS(off)}$



หมายเหตุ ณ จุดที่ค่า V_{DS} มากๆ JFET จะเกิดการพังได้ (break down) นั่นคือ I_D จะเพิ่มขึ้นอย่างควบคุมไม่ได้ ถ้า $V_{DS} > V_{DSmax}$

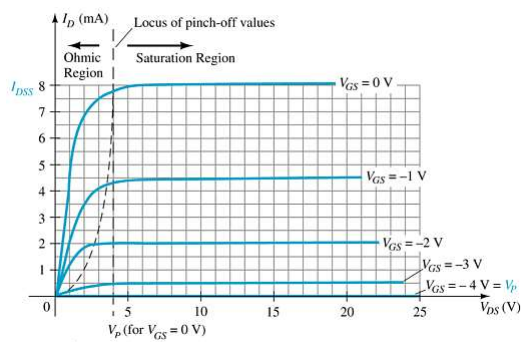
JFET Operating Characteristics

ความต้านทานควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage-Controlled Resistor)

พื้นที่ทางซ้ายของจุด pinch-off เรียกว่า
ohmic region

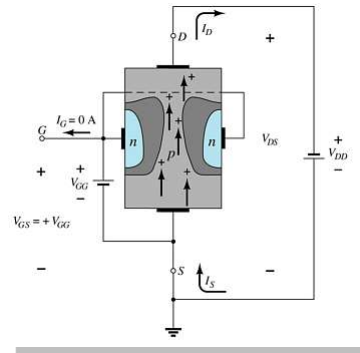
JFET สามารถถูกใช้เป็นตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ (variable resistor) โดยมี V_{GS} เป็นตัวควบคุมความต้านทานระหว่าง drain-source หรือ r_d เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นลบมากขึ้น ค่าความต้านทาน r_d จะเพิ่มขึ้น

$$r_d = \frac{r_o}{\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2}$$



p-Channel JFETS

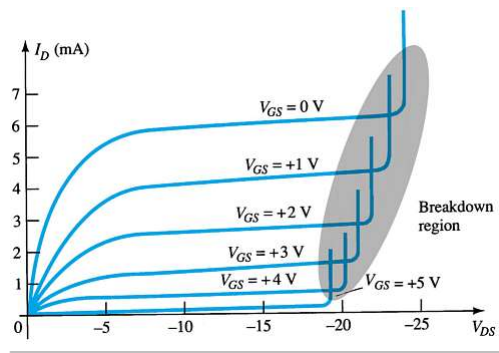
เหมือนกับ n-channel แต่ขั้วของแรงดัน
และทิศทางของกระแสตรงข้ามกัน



p-Channel JFET Characteristics

เมื่อ V_{GS} เพิ่มค่าเป็นบวกมากขึ้น

- ▶ เขตปลอดภัยเพิ่มขึ้น
- ▶ I_D ลดลง ($I_D < I_{DSS}$)
- ▶ จนกระทั่ง $I_D = 0A$



JFET Transfer Characteristics: การส่งผ่านคุณลักษณะ

ใน BJT ใช้ β แทนความสัมพันธ์ระหว่าง I_B (อินพุต) และ I_C (เอาต์พุต)

ใน JFET ความสัมพันธ์ของ V_{GS} (อินพุต) และ I_D (เอาต์พุต) มีความซับซ้อนกว่าดังนี้

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

การพล็อตการส่งผ่านเส้นโค้งคุณลักษณะของ JFET

ค่าของ I_{DSS} และ V_P ($V_{GS(off)}$) จะได้จาก specification sheet เราสามารถพล็อตการส่งผ่านเส้นโค้งคุณลักษณะได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นที่ 1

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

ให้ $V_{GS} = 0V$ จะได้ $I_D = I_{DSS}$

ขั้นที่ 2

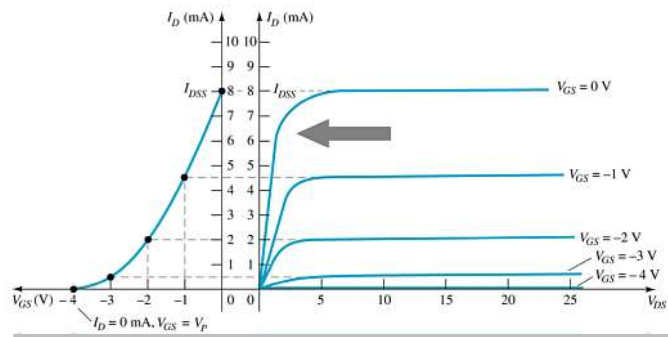
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

ให้ $V_{GS} = V_P$ ($V_{GS(off)}$) จะได้ $I_D = 0A$

ขั้นที่ 3

$$\text{ให้ } V_{GS} \text{ อยู่ระหว่าง } 0V \text{ ถึง } V_P \text{ จะได้ } I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

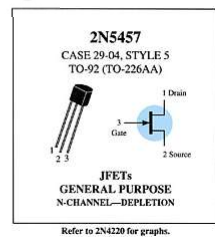
JFET Transfer Curve: การส่งผ่านของเส้นโค้งคุณลักษณะ



JFET Specifications Sheet

Maximum Ratings

MAXIMUM RATINGS			
Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DS}	25	Vdc
Drain-Gate Voltage	V_{DG}	25	Vdc
Reverse Gate-Source Voltage	V_{GSS}	-25	Vdc
Gate Current	I_{GS}	10	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	P_D	310	mW
Derate above 25°C		2.82	mW/ $^\circ\text{C}$
Junction Temperature Range	T_J	125	$^\circ\text{C}$
Storage Channel Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$



more...

Electrical Characteristics

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Gate-Source Breakdown Voltage ($I_G = -10\ \mu\text{A}$, $V_{DS} = 0$)	V_{BRGSS}	-25	-	-	Vdc
Gate Reverse Current ($V_{GS} = -15\ \text{Vdc}$, $V_{DS} = 0$) ($V_{GS} = -15\ \text{Vdc}$, $V_{DS} = 0$, $T_A = 100^\circ\text{C}$)	I_{GSS}	-	-	-1.0 -200	nAdc
Gate Source Cutoff Voltage ($V_{DS} = 15\ \text{Vdc}$, $I_D = 10\ \text{nAdc}$)	$V_{GS(off)}$	-0.5	-	-6.0	Vdc
Gate Source Voltage ($V_{DS} = 15\ \text{Vdc}$, $I_D = 100\ \mu\text{Adc}$)	V_{GS}	-	-2.5	-	Vdc

ON CHARACTERISTICS

Zero-Gate-Voltage Drain Current* ($V_{DS} = 15\ \text{Vdc}$, $V_{GS} = 0$)	2N5457	I_{DSS}	1.0	3.0	5.0	mAdc
--	--------	-----------	-----	-----	-----	------

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

Forward Transfer Admittance Common Source* ($V_{DS} = 15\ \text{Vdc}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\ \text{kHz}$)	2N5457	$ y_{fs} $	1000	-	5000	μmhos
Output Admittance Common Source* ($V_{DS} = 15\ \text{Vdc}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\ \text{kHz}$)		$ y_{os} $	-	10	50	μmhos
Input Capacitance ($V_{DS} = 15\ \text{Vdc}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\ \text{MHz}$)		C_{iss}	-	4.5	7.0	pF
Reverse Transfer Capacitance ($V_{DS} = 15\ \text{Vdc}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\ \text{MHz}$)		C_{rss}	-	1.5	3.0	pF

*Pulse Test: Pulse Width $\leq 0.10\ \text{ms}$; Duty Cycle $\leq 10\%$

Specification Sheet

Electrical Characteristics

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise stated)		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS						
Drain Source Breakdown Voltage ($V_{GS} = -7.0\text{ V}$, $I_D = 5.0\text{ }\mu\text{A}$)	2N3797	V_{BRDSS}	20	25	-	Vdc
Gate Reverse Current (1) ($V_{GS} = -10\text{ V}$, $V_{DS} = 0$) ($V_{GS} = -10\text{ V}$, $V_{DS} = 0$, $T_A = 150^\circ\text{C}$)		I_{GSS}	-	-	1.0 200	pAdc
Gate Source Cutoff Voltage ($I_D = 2.0\text{ }\mu\text{A}$, $V_{DS} = 10\text{ V}$)	2N3797	$V_{GS(off)}$	-	-5.0	-7.0	Vdc
Drain-Gate Reverse Current (1) ($V_{DS} = 10\text{ V}$, $I_G = 0$)		I_{DGR}	-	-	1.0	pAdc
ON CHARACTERISTICS						
Zero-Gate-Voltage Drain Current ($V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_{GS} = 0$)	2N3797	I_{DSS}	2.0	2.9	6.0	mAdc
On-State Drain Current ($V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_{GS} = +3.5\text{ V}$)	2N3797	$I_{D(on)}$	9.0	14	18	mAdc
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS						
Forward Transfer Admittance ($V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	2N3797	$ y_{fs} $	1500	2300	3000	μmhos
($V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	2N3797		1500	-	-	
Output Admittance ($I_D = 10\text{ V}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	2N3797	$ y_{os} $	-	27	60	μmhos
Input Capacitance ($V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	2N3797	C_{iss}	-	6.0	8.0	pF
Reverse Transfer Capacitance ($V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)		C_{rss}	-	0.5	0.8	pF
FUNCTIONAL CHARACTERISTICS						
Noise Figure ($V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\text{ kHz}$, $R_G = 3\text{ megohms}$)		NF	-	3.8	-	dB

(1) This value of current includes both the FET leakage current as well as the leakage current associated with the test socket and fixture when measured under best attainable conditions.

Specification Sheet

Electrical Characteristics Maximum Ratings

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T _A = 25°C unless otherwise noted.)				
Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Drain-Source Breakdown Voltage (I _D = 10 μ A, V _{GS} = 0)	V _{DS(BR)}	25	–	V _{DS}
Zero-Gate-Voltage Drain Current (V _{DS} = 10 V, V _{GS} = 0) T _A = 25°C T _A = 150°C	I _{DSS}	–	10 10	nA μ A
Gate Reverse Current (V _{GS} = $\pm$ 15 V _{DS} , V _{DS} = 0)	I _{GSS}	–	$\pm$ 10	pA
ON CHARACTERISTICS				
Gate Threshold Voltage (V _{DS} = 10 V, I _D = 10 μ A)	V _{GS(th)}	1.0	5	V _{DS}
Drain-Source On-Voltage (I _D = 2.0 mA, V _{GS} = 10V)	V _{DS(on)}	–	1.0	V
On-State Drain Current (V _{GS} = 10 V, V _{DS} = 10 V)	I _{D(on)}	3.0	–	mA
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS				
Forward Transfer Admittance (V _{DS} = 10 V, I _D = 2.0 mA, f = 1.0 kHz)	y _{fs}	1000	–	μ mho
Input Capacitance (V _{DS} = 10 V, V _{GS} = 0, f = 140 kHz)	C _{iss}	–	5.0	pF
Reverse Transfer Capacitance (V _{DS} = 0, V _{GS} = 0, f = 140 kHz)	C _{rs}	–	1.3	pF
Drain-Substrate Capacitance (V _{DS(sat)} = 10 V, f = 140 kHz)	C _{DS(sat)}	–	5.0	pF
Drain-Source Resistance (V _{GS} = 10 V, I _D = 0, f = 1.0 kHz)	r _{DS(on)}	–	300	ohms
SWITCHING CHARACTERISTICS				
Turn-On Delay (Fig. 5)	t _{DI}	–	45	ns
Rise Time (Fig. 6)	t _r	–	65	ns
Turn-Off Delay (Fig. 7)	t _{d2}	–	60	ns
Fall Time (Fig. 8)	t _f	–	100	ns

more...

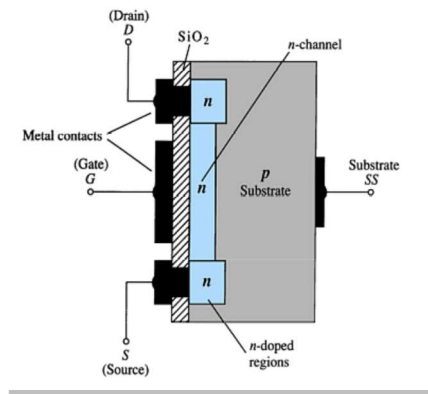
MOSFETs

MOSFETs มีคุณลักษณะเหมือนกับ JFETs พร้อมกับคุณลักษณะเพิ่มเติมที่ขยายการทำงานได้กว้างขวางขึ้น

MOSFET มี 2 ชนิด

- Depletion-Type
- Enhancement-Type

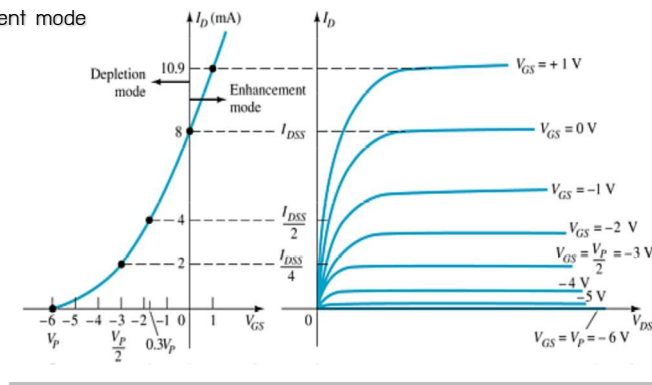
Depletion-Type MOSFET Construction



การทำงานของ MOSFET

D-MOSFET ทำงานได้ใน 2 โหมด

- ▶ Depletion mode
- ▶ Enhancement mode



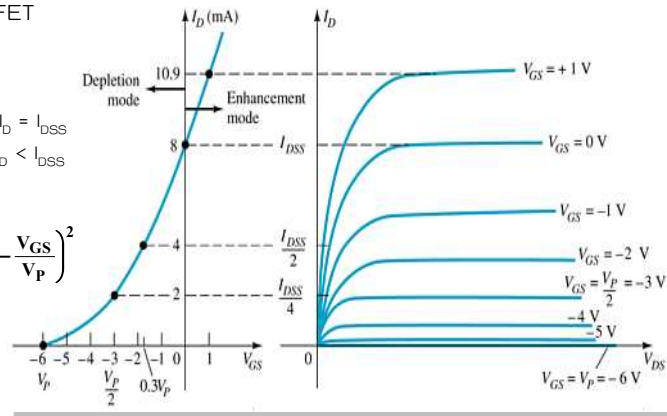
Depletion-Type MOSFET in Depletion Mode

Depletion Mode

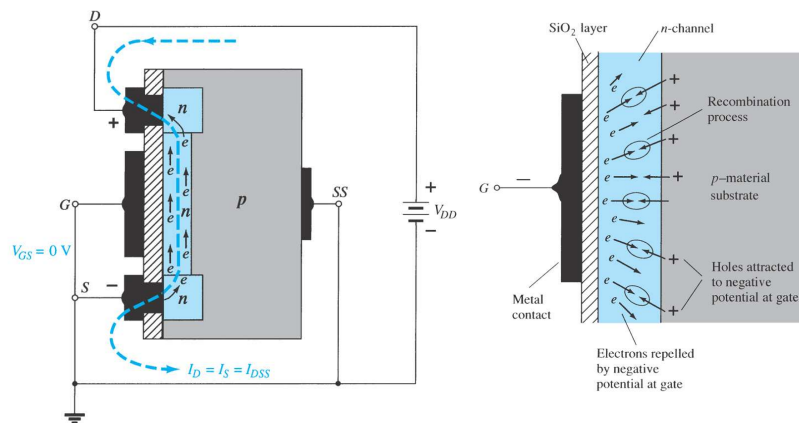
คุณลักษณะเหมือนกับ JFET

- ▶ เมื่อ $V_{GS} = 0V$ จะได้ $I_D = I_{DSS}$
- ▶ เมื่อ $V_{GS} < 0V$ จะได้ $I_D < I_{DSS}$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$



D-MOSFET



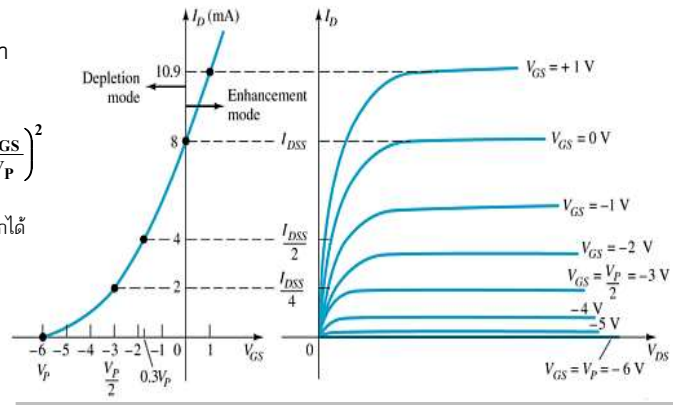
Depletion-Type MOSFET in Enhancement Mode

Enhancement Mode

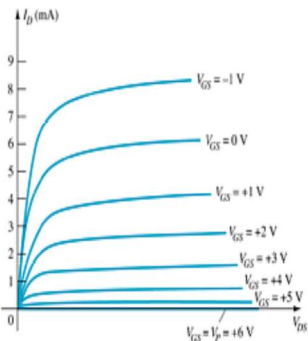
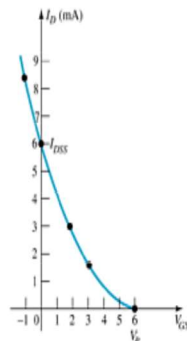
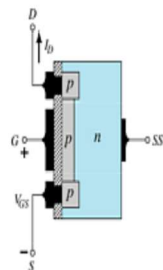
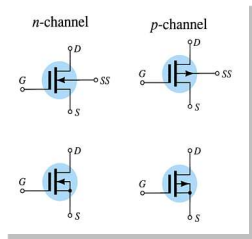
- ▶ $V_{GS} > 0V$
- ▶ I_D สามารถมีค่ามา

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

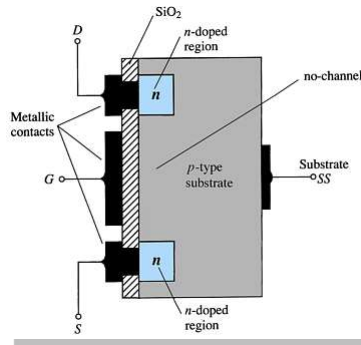
หมายเหตุ V_{GS} มีค่าเป็นบวกได้



p-Channel Depletion-Type MOSFET



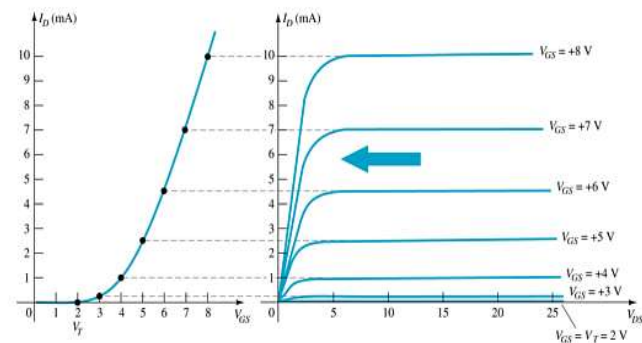
Enhancement-Type MOSFET Construction



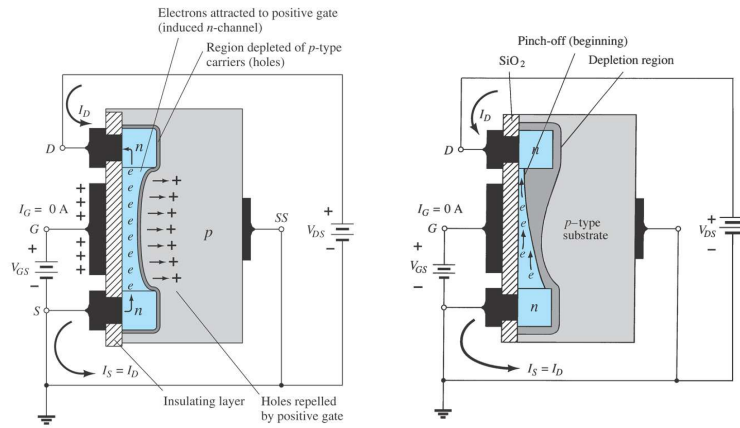
การทำงานของ Enhancement-Type MOSFET

E-MOSFET ทำงานในโหมด enhancement mode เท่านั้น

- ▶ V_{GS} เป็นค่าบวกเสมอ
- ▶ เมื่อ V_{GS} เพิ่มขึ้น I_D เพิ่มขึ้น
- ▶ พิจารณาเมื่อ V_{GS} คงที่และ V_{DS} เพิ่มขึ้นจนกระทั่ง I_D อิ่มตัวหรือ saturates (I_{DSS}) ค่า V_{DSsat} เป็นค่าแรงดันอิ่มตัว



E-MOSFET



Enhancement-Type MOSFET Transfer Curve

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

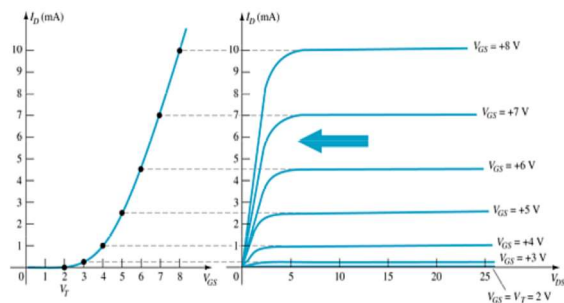
โดยที่

V_T = threshold voltage หรือค่าแรงดันที่ MOSFET เริ่มทำงาน

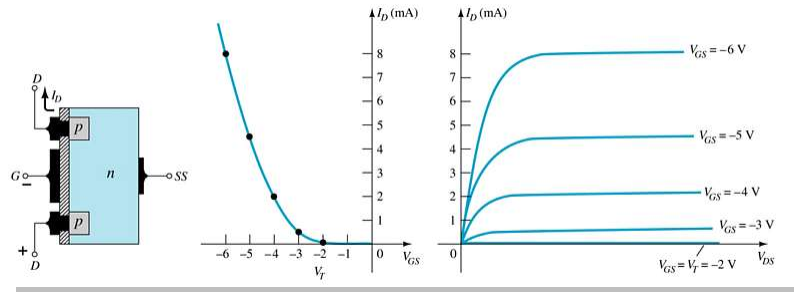
k = ค่าคงที่จาก specification sheet

k สามารถหาได้จาก

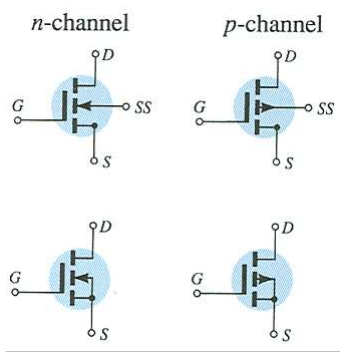
$$k = \frac{I_{D(ON)}}{(V_{GS(ON)} - V_T)^2}$$



p -Channel Enhancement-Type MOSFETs

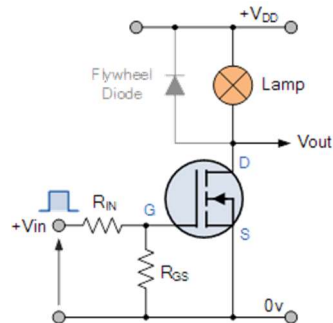


MOSFET Symbols



An example of using the MOSFET as a switch

Lets assume that the lamp is rated at 6v, 24W and is fully "ON", the standard MOSFET has a channel on-resistance ($R_{DS(on)}$) value of 0.1ohms. Calculate the power dissipated in the MOSFET switching device.



$$P = V \times I_D$$

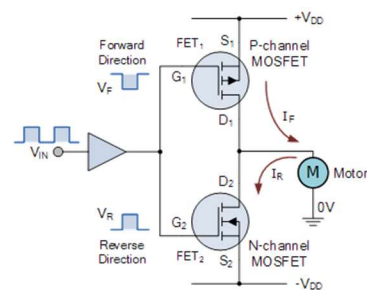
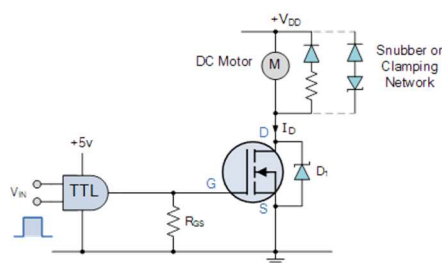
$$\therefore I_D = \frac{P}{V} = \frac{24}{6} = 4.0 \text{ amps}$$

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P_D = I_D^2 \times R_{DS}$$

$$\therefore P_D = 4^2 \times 0.1 = 1.6 \text{ watts}$$

Power MOSFET Motor Control



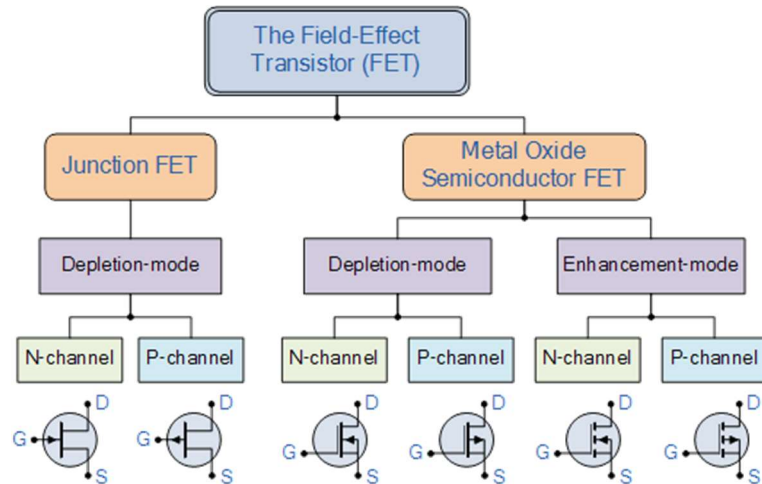
MOSFET 1	MOSFET 2	Motor Function
OFF	OFF	Motor Stopped (OFF)
ON	OFF	Motor Rotates Forward
OFF	ON	Motor Rotates Reverse
ON	ON	NOT ALLOWED

Field Effect Transistor Tutorial

- **Field Effect Transistors**, or FET's are "**Voltage Operated Devices**" and can be divided into two main types: Junction-gate devices called JFET's and Insulated-gate devices called IGFET's or more commonly known as MOSFETs.
- Insulated-gate devices can also be sub-divided into Enhancement types and Depletion types. All forms are available in both N-channel and P-channel versions.
- FET's have very high input resistances so very little or no current (MOSFET types) flows into the input terminal making them ideal for use as electronic switches.
- The input impedance of the MOSFET is even higher than that of the JFET due to the insulating oxide layer and therefore static electricity can easily damage MOSFET devices so care needs to be taken when handling them.
- When no voltage is applied to the gate of an enhancement FET the transistor is in the "OFF" state similar to an "open switch".
- The depletion FET is inherently conductive and in the "ON" state when no voltage is applied to the gate similar to a "closed switch".

- FET's have much higher current gains compared to bipolar junction transistors.
- The most common FET connection is the Common Source (CS) configuration but Common Gate (CG) and Common Drain (CD) configurations are also available.
- MOSFETs can be used as ideal switches due to their very high channel "OFF" resistance, low "ON" resistance.
- To turn the N-channel JFET transistor "OFF", a negative voltage must be applied to the gate.
- To turn the P-channel JFET transistor "OFF", a positive voltage must be applied to the gate.
- N-channel depletion MOSFETs are in the "OFF" state when a negative voltage is applied to the gate to create the depletion region.
- P-channel depletion MOSFETs, are in the "OFF" state when a positive voltage is applied to the gate to create the depletion region.
- N-channel enhancement MOSFETs are in the "ON" state when a "+ve" (positive) voltage is applied to the gate.
- P-channel enhancement MOSFETs are in the "ON" state when "-ve" (negative) voltage is applied to the gate.

The Field Effect Transistor Chart



Comparison

Property	BJT	MOSFET	JFET
Gm	Best	Worst	Medium
Speed	High	Medium	Low
Noise	Moderate	Worst	Best
Good Switch	No	Yes	Yes
High-Z Gate	No	Yes	Yes
ESD Sensitivity	Less	More	Less

MOSFET BIASING

$$V_{GS} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

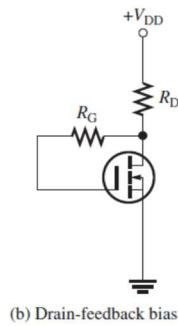
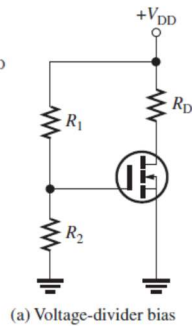
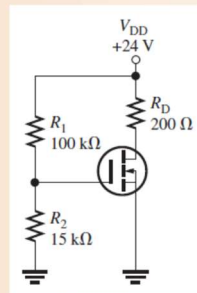


FIGURE 8-46
Common E-MOSFET biasing
arrangements.

Determine V_{GS} and V_{DS} for the E-MOSFET circuit in Figure 8-47. Assume this particular MOSFET has minimum values of $I_{D(on)} = 200 \text{ mA}$ at $V_{GS} = 4 \text{ V}$ and $V_{GS(th)} = 2 \text{ V}$.

FIGURE 8-47



For the E-MOSFET in Figure 8-47, the gate-to-source voltage is

$$V_{GS} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} = \left(\frac{15 \text{ k}\Omega}{115 \text{ k}\Omega} \right) 24 \text{ V} = 3.13 \text{ V}$$

To determine V_{DS} , first find K using the minimum value of $I_{D(on)}$ and the specified voltage values.

$$K = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS} - V_{GS(th)})^2} = \frac{200 \text{ mA}}{(4 \text{ V} - 2 \text{ V})^2} = \frac{200 \text{ mA}}{4 \text{ V}^2} = 50 \text{ mA/V}^2$$

Now calculate I_D for $V_{GS} = 3.13 \text{ V}$.

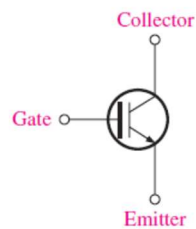
$$\begin{aligned} I_D &= K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 = (50 \text{ mA/V}^2)(3.13 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 \\ &= (50 \text{ mA/V}^2)(1.13 \text{ V})^2 = 63.8 \text{ mA} \end{aligned}$$

Finally, calculate V_{DS} .

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 24 \text{ V} - (63.8 \text{ mA})(200 \Omega) = \mathbf{11.2 \text{ V}}$$

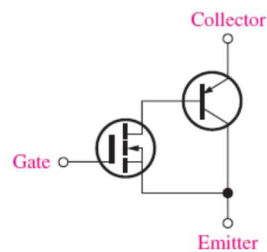
Determine V_{GS} and V_{DS} for the circuit in Figure 8–47 given $I_{D(on)} = 100 \text{ mA}$ at $V_{GS} = 4 \text{ V}$ and $V_{GS(th)} = 3 \text{ V}$.

THE IGBT



▲ FIGURE 8–51

A symbol for the IGBT (insulated-gate bipolar transistor).



▲ FIGURE 8–52

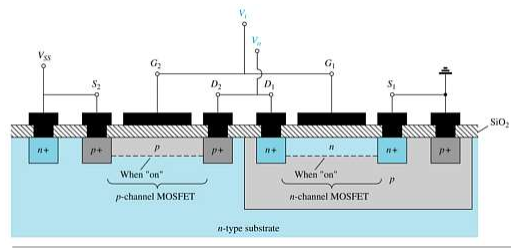
Simplified equivalent circuit for an IGBT.

Operating frequency Medium High Low
 Switching speed Medium Fast (ns) Slow
 Saturation voltage Low High Low

FEATURES	IGBT	MOSFET	BJT
Type of input drive	Voltage	Voltage	Current
Input resistance	High	High	Low
Operating frequency	Medium	High	Low
Switching speed	Medium	Fast (ns)	Slow(uS)
Saturation voltage	Low	High	Low

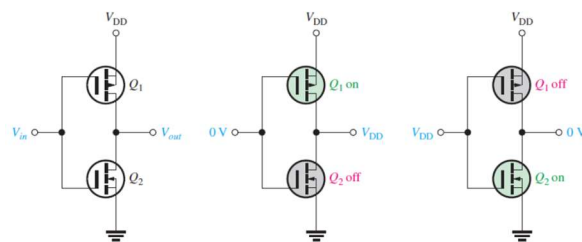
CMOS Devices

CMOS (complementary MOSFET) ใช้
 ทั้ง p -channel และ n -channel MOSFET
 บน substrate เดียวกัน

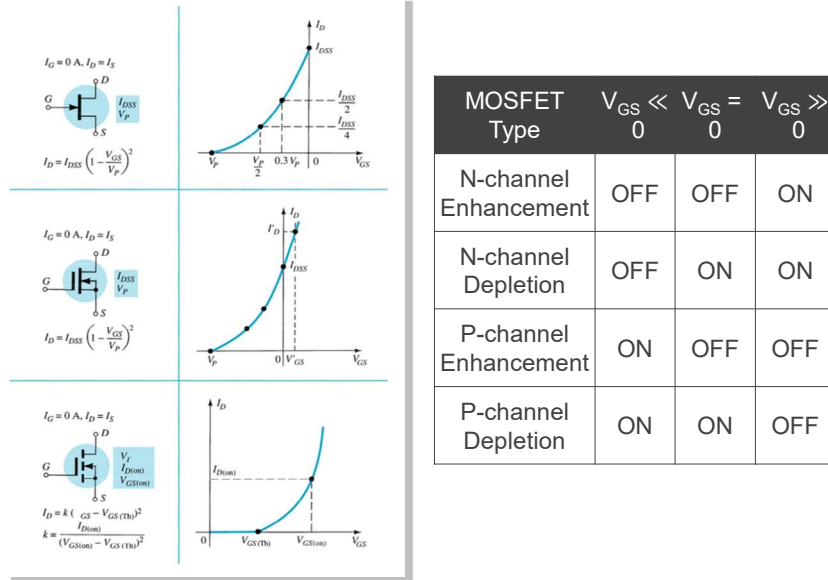


ข้อดี

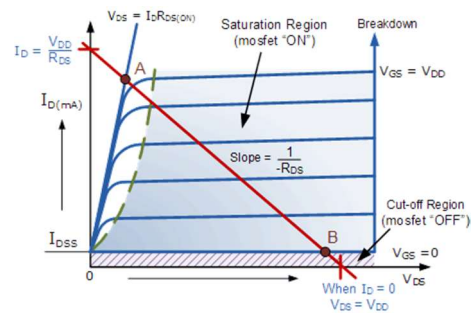
- ▶ มีประโยชน์ในวงจรตรรกะ
- ▶ มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง
- ▶ ทำงานได้เร็ว
- ▶ กินไฟน้อย



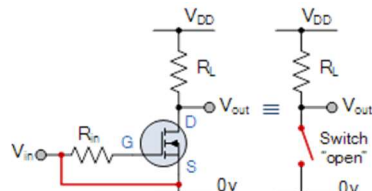
Summary Table



MOSFET Characteristics Curves

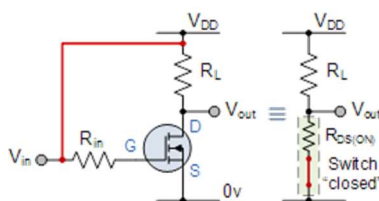


Cut-off Characteristics



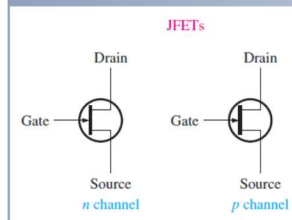
- The input and Gate are grounded (0V)
- Gate-source voltage less than threshold voltage $V_{GS} < V_{TH}$
- MOSFET is "OFF" (Cut-off region)
- No Drain current flows ($I_D = 0$ Amps)
- $V_{OUT} = V_{DS} = V_{DD} = "1"$
- MOSFET operates as an "open switch"

Saturation Characteristics



- The input and Gate are connected to V_{DD}
- Gate-source voltage is much greater than threshold voltage $V_{GS} > V_{TH}$
- MOSFET is "ON" (saturation region)
- Max Drain current flows ($I_D = V_{DD} / R_L$)
- $V_{DS} = 0V$ (ideal saturation)
- Min channel resistance $R_{DS(on)} < 0.1\Omega$
- $V_{OUT} = V_{DS} \cong 0.2V$ due to $R_{DS(on)}$
- MOSFET operates as a low resistance "closed switch"

JFETS



- Gate-source *pn* junction must be reverse-biased.
- V_{GS} controls I_D .
- Value of V_{DS} at which I_D becomes constant is the pinch-off voltage.
- Value of V_{GS} at which I_D becomes zero is the cutoff voltage, $V_{GS(off)}$.
- I_{DSS} is drain current when $V_{GS} = 0$.

- Transfer characteristic:

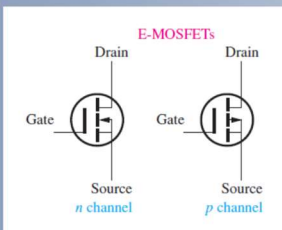
$$I_D \equiv I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

- Forward transconductance:

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)$$

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|}$$

D-MOSFETS



Can be operated in either depletion or enhancement modes. V_{GS} can be either polarity when biased at $V_{GS} = 0$ V.

- *Depletion mode:*

n channel: V_{GS} negative

p channel: V_{GS} positive

- *Enhancement mode:*

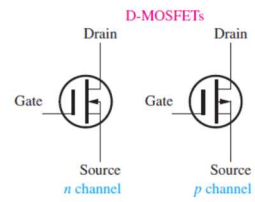
n channel: V_{GS} positive

p channel: V_{GS} negative

- V_{GS} controls I_D .
- Value of V_{GS} at which I_D becomes zero is the cutoff voltage, $V_{GS(off)}$.
- I_{DSS} is drain current when $V_{GS} = 0$.
- Transfer characteristic:

$$I_D \equiv I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

E-MOSFETS

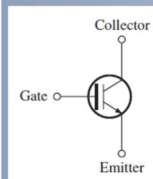


Operates in enhancement mode only.

- V_{GS} must exceed $V_{GS(th)}$.
- **Enhancement mode:**
 - n channel: V_{GS} positive
 - p channel: V_{GS} negative
- V_{GS} controls I_D .
- Value of V_{GS} at which I_D begins is the threshold voltage, $V_{GS(th)}$.
- Transfer characteristic:

$$I_D = K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$
- K in formula can be calculated by substituting datasheet values $I_{D(on)}$ for I_D and V_{GS} at which $I_{D(on)}$ is specified for V_{GS} .

IGBT



- Voltage controlled like a MOSFET
- Output characteristics like a BJT
- Three terminals: gate, collector, emitter