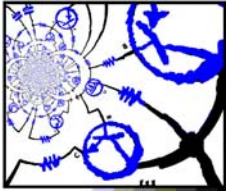
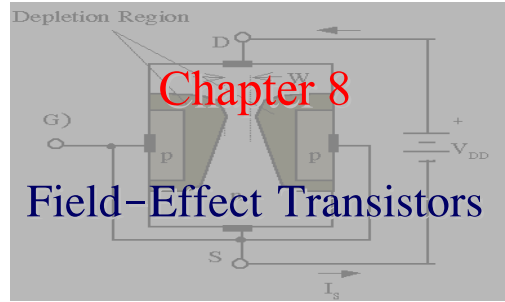


Basic Electronics

8



Field-Effect Transistors



Chapter 8

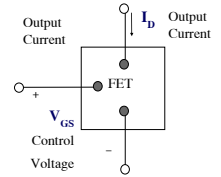
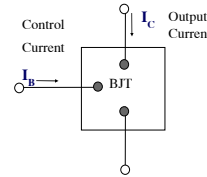
Field-Effect Transistors

เนื้อหา : ชนิดของ FET จังก์ชันฟิลด์เอฟเฟกทรานซิสเตอร์ แผ่นแสดง
 ข้อกำหนดลักษณะสมบัติของ JFET การเปรียบเทียบระหว่าง JFET และ BJT
 ทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต มอสเฟตแบบเพิ่มพูน มอสเฟตแบบลดพาหะ

บทนำ

BJT : Current-controlled Device) การไหลของกระแส Electron และ Hole
 ทางด้านเอาท์พุทจะไหลผ่านรอยต่อ p-n

FET : Voltage-controlled Device



FET แบ่งออกเป็นแบบ

- n-channel : ใช้แรงดันควบคุมการไหลของกระแสอิเล็กตรอน (Electron)
- p-channel : ใช้แรงดันควบคุมการไหลของกระแสช่องว่าง (Hole)

คุณสมบัติของ FET เทียบกับ BJT

ข้อดีของ FET

- ∥ Z_i สูงมาก (MΩ ถึง >1000 MΩ) :: BJT ระดับ kΩ
- ∥ ไม่มี Offset Voltage เมื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์
- ∥ คุณสมบัติหลัก ไม่ถูกผลกระทบจากการรังสี :: β ของ BJT ไวต่อรังสี
- ∥ Noise ต่ำ :: BJT มี Noise สูง จากพาหะไหลผ่านรอยต่อ p-n
- ∥ มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดีกว่า BJT
- ∥ โครงสร้างเล็กกว่า BJT สามารถผลิตเป็นไอซีเล็กๆ ที่มี FET ได้จำนวนมาก

ข้อเสียของ FET

- ∥ มีค่า เกนแบนด์วิดท์ (Gain-bandwidth) ต่ำ *
- ∥ เสียหายได้ง่ายจากไฟฟ้าสถิต

* ปัจจุบัน FET บางชนิดที่สามารถใช้งานความถี่สูงมาก ได้

ชนิดของ FET

ในที่นี้จะศึกษา FET 2 ชนิดคือ

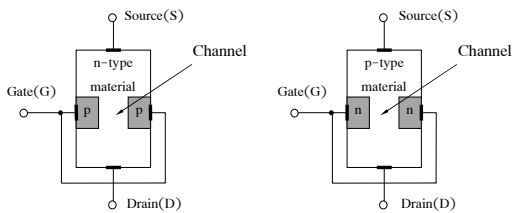
1. จังกัชน์ฟิลด์เอฟเฟกทรานซิสเตอร์
(Junction Field-Effect Transistor, JFET)
2. เมทัลออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ฟิลด์เอฟเฟกทรานซิสเตอร์
(Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)

Junction Field-Effect Transistor, JFET

JFET จะมีแชนแนล (Channel) หรือช่องทางเดินพาหะ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปได้

ความกว้างของ Channel ถูกควบคุมได้โดยแรงดันอินพุต (V_{GS}) ทำให้สามารถควบคุมปริมาณการไหลของกระแสที่ผ่านแชนแนลได้

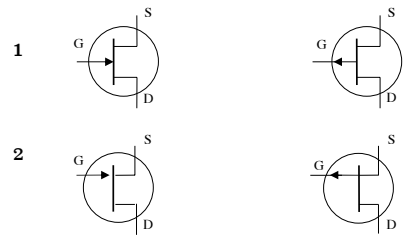
โครงสร้าง JFET



(a) n-channel JFET

(b) p-channel JFET

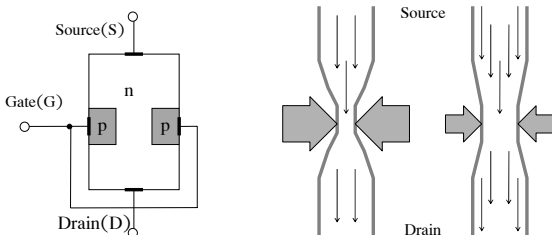
สัญลักษณ์ของ JFET ที่พบได้โดยทั่วไป



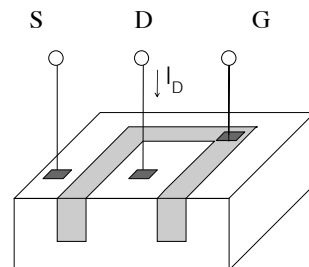
(a) n-channel

(b) p-channel

เพื่อให้เข้าใจการควบคุมการไหลของกระแส I_D ผ่าน Channel สามารถเปรียบเทียบการควบคุมการไหลของน้ำผ่านท่อน้ำ



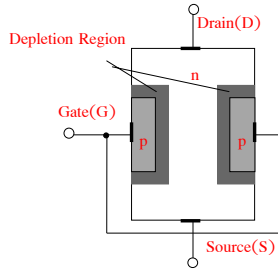
โครงสร้างของ JFET ทำให้มีความแตกต่างของ ขา เดรน และ ขา ซอร์ส จึงไม่สามารถสลับกันได้ทางปฏิบัติ



การทำงานของ JFET n-channel

ส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่าง p-type material และ n-type material จะเป็น p-n Junction ทำให้เกิด บริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) เหมือนไดโอด

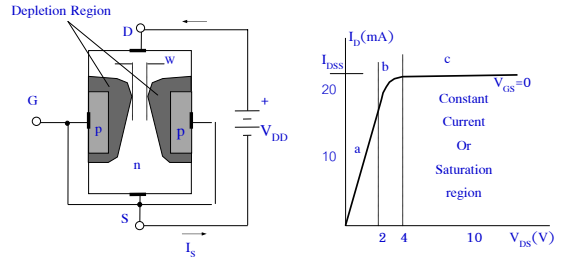
เมื่อไม่มีการไบแอส (No Bias) Depletion Region จะเป็น **ฉนวน** อยู่บริเวณรอยต่อ p-n Junction



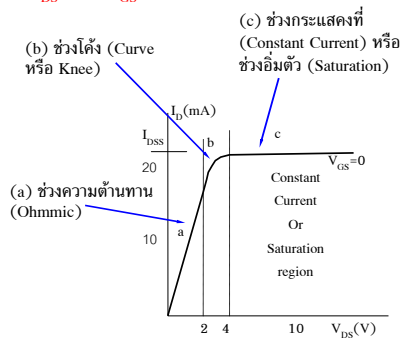
เมื่อ ให้ $V_{GS} = 0V$ แล้วปรับค่า V_{DS}

กระแสจากขา Drain จะไม่ไหลออกไปยังขา Gate เนื่องจาก Reverse Bias ดังนั้น

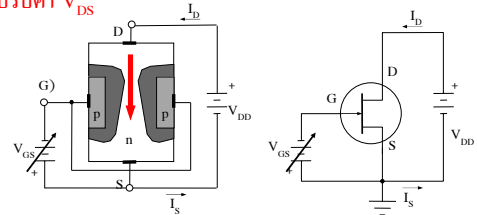
$$I_G = 0 \text{ และ } I_D = I_S$$



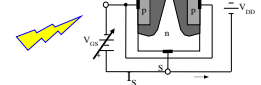
กราฟ I_D vs V_{DS} เมื่อ $V_{GS} = 0$



เมื่อมีการป้อนแรงดันลบให้กับขา เกต-ซอส ($V_{GS} < 0$) แล้วปรับค่า V_{DS}



ที่ V_{DS} คงที่ ยิ่ง V_{GS} มีค่าเป็นลบเท่าไร Depletion Region จะยิ่งกว้างมากขึ้น ทำให้ I_D ไหลได้น้อยลง



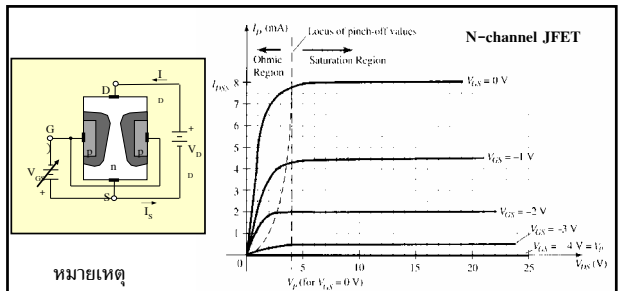
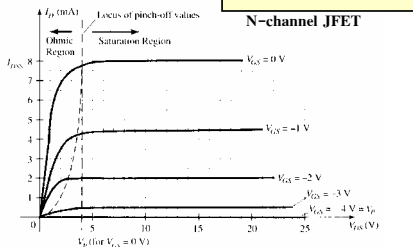
กราฟ I_D vs V_{DS} เมื่อ V_{GS} เป็นลบ

เมื่อแรงดัน V_{DS} อยู่ในช่วง Saturation ($> 5V$)

$$I_D = I_{DSS} \text{ (สูงสุด) เมื่อ } V_{GS} = 0$$

$$I_D = 0 \text{ เมื่อ } |V_{GS}| \text{ ณ } |V_p|$$

V_p : Pinch-Off Voltage



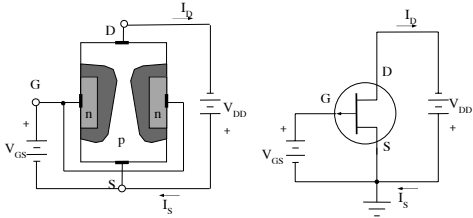
V_p Pinch-Off Voltage มีสองความหมาย คือ

1. เป็นแรงดัน V_{DS} ที่ทำให้ I_D เริ่มเข้าสู่ช่วง Constant Current เมื่อ $V_{GS} = 0$
2. เป็นแรงดัน V_{GS} ที่ทำให้ JFET OFF

JFET แบบ p-channel

คล้าย JFET แบบ n-channel แต่ต่างกันที่ ขั้วของแรงดันทั้งหมดจะตรงกันข้ามกับ JFET แบบ n-channel
การใช้งาน

$$V_p > 0, V_{GS} \approx 0 \text{ และ } V_{DS} < 0$$



Breakdown Region

เพิ่มแรงดัน V_{DS} ขึ้นมาเรื่อยๆ จะทำให้ FET เปลี่ยนจากพฤติกรรม Constant Current เป็นการนำกระแสอย่างง่าย ซึ่งจะให้อุปกรณ์ JFET เสียหายได้

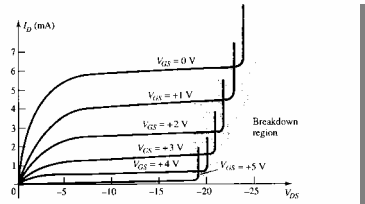


Figure 5.12 p-Channel JFET characteristics with $I_{DSS} = 6 \text{ mA}$ and $V_p = +6 \text{ V}$

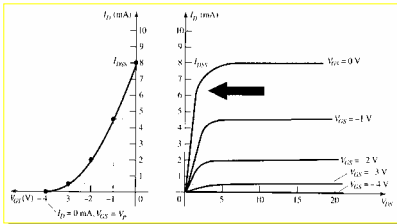
ลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ FET, I_D กับ V_{DS} (FET transfer characteristic)

ลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ JFET เป็นไปตามสมการช็อคเลย์ (Shockley's Equation) ในช่วง 0 ๗ $|V_{GS}|$ ๗ $|V_p|$ ดังนี้

$$I_D = I_{DSS} (1 - V_{GS}/V_p)^2$$

$$I_D = I_{DSS} \text{ เมื่อ } V_{GS} = 0$$

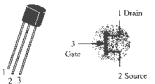
$$V_{GS} = V_p \text{ เมื่อ } I_D = 0$$



JFET Specification Sheets

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_{GS}	25	Vdc
Gate Current	I_{GK}	10	mA
Total Power Dissipation (Case Temp. = 25°C)	P_T	100	mW
Power Dissipation (Case Temp. = 100°C)	P_T	25	mW
Junction Temperature Range	T_J	125	°C
Storage Channel Temperature Range	T_{CQ}	-65 to +150	°C

2N5457
CASE 29-04, STYLE 5
TO-92 (TO-226AA)



JFETS
GENERAL PURPOSE
N-CHANNEL—DEPLETION

Refer to 2N4220 for graphs.

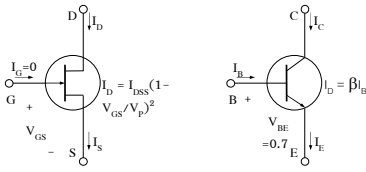
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Gate-Source Breakdown Voltage ($I_G = -10 \mu\text{A}$, $V_{DS} = 0$)	V_{BSS}	-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 ($V_{DS} = 15 \text{ Vdc}$, $I_D = 30 \mu\text{Adc}$)	$V_{GS(off)}$	-2.5	-	-	Vdc
Gate-Source Voltage ($V_{DS} = 15 \text{ Vdc}$, $I_D = 100 \mu\text{Adc}$)	2N5457	V_{GS}	-	2.5	-

ON CHARACTERISTICS

Zero-Gate-Voltage Drain Current* ($V_{GS} = 0 \text{ Vdc}$, $V_{DS} = 0$)	Symbol	Value	Unit	
2N5457	I_{DSS}	6	mA	
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS				
Forward Transfer Admittance Common Source* ($V_{DS} = 15 \text{ Vdc}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	$ y_{fs} $	1000	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 ($V_{GS} = 15 \text{ Vdc}$, $V_{DS} = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	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

การเปรียบเทียบระหว่าง JFET และ BJT

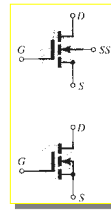


JFET	BJT
$I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_P)^2$	$I_C = \beta I_B$
$I_D = I_S$	$I_C = I_E$
$I_G = 0$	$V_{BE} = 0.7$

ทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต (MOSFET)

MOSFET ย่อมาจาก Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect Transistor อินพุตของ MOSFET จะมีชั้นของ SiO₂ ซึ่งเป็นฉนวนมาชั้นอยู่ที่ขาคัด ทำให้ MOSFET มีอินพุตอิมพีแดนซ์ที่สูงมาก

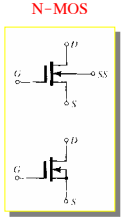
แบ่งเป็น 2 แบบ คือ



N-MOS

1. MOSFET แบบเพิ่มพูน (Enhancement type MOSFET)

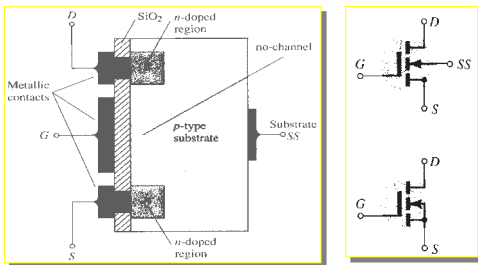
2. MOSFET แบบลดพาหะ (Depletion type MOSFET)



N-MOS

ENHANCEMENT TYPE MOSFET

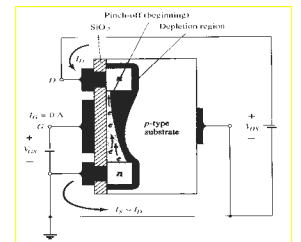
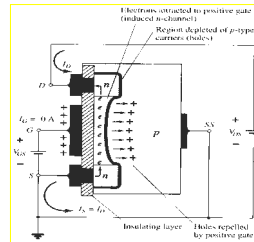
n-channel Enhancement Type MOSFET



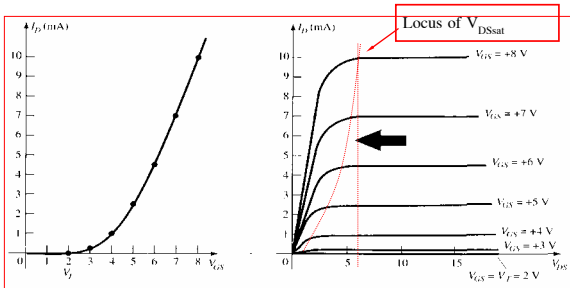
คุณสมบัติ

เมื่อ $V_{GS} = 0$ ($V_{DS} > 0$) -> MOSFET ไม่มีการเคลื่อนที่

เมื่อ $V_{GS} > 0$ ($V_{DS} > 0$) -> เพิ่ม V_{GS} -> สนามแม่เหล็กเข้มข้นขึ้น -> Free Carrier บริเวณผิว SiO₂ เพิ่มมากขึ้น -> กระแส I_D ไหล



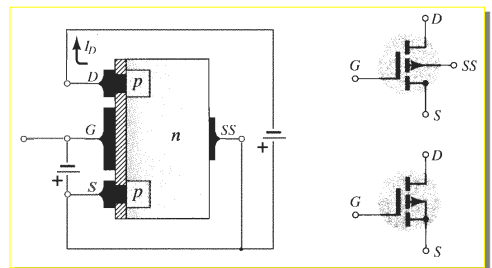
คุณลักษณะด้านตรง และ transfer characteristics ของ n-channel enhancement-type MOSFET



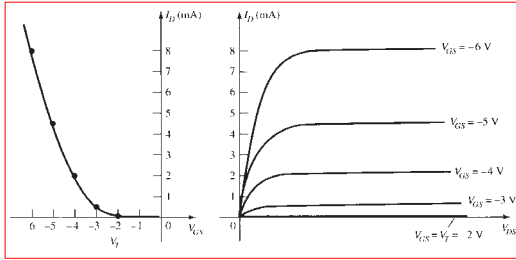
V_T : Threshold Voltage (หรือ $V_{GS(th)}$) ระดับ V_{GS} ที่ทำให้ I_D เริ่มไหล

p-Channel Enhancement-Type MOSFETs

เหมือน n-channel แต่กลับขั้วสวิตช์ n-type และ p-type



คุณลักษณะด้านทราน และ transfer characteristics ของ p-channel enhancement-type MOSFET



Specification Sheets

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DS}	25	Vdc
Drain-Gate Voltage	V_{DG}	30	Vdc
Gate-Source Voltage*	V_{GS}	30	Vdc
Drain Current	I_D	30	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Drains above 25°C	P_D	300 1.7	mW mW/C
Junction Temperature Range	T_J	-55 to +175	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +175	$^\circ\text{C}$

* Transient protection of ± 25 Volt with one case gate-cathode diode.

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

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Drain-Source Breakdown Voltage ($I_D = 10 \mu\text{A}$, $V_{GS} = 0$)	$V_{DS(BR)}$	25	-	Vdc
Zero-Gate-Voltage Drain Current ($V_{GS} = 10 \text{ V}$, $V_{DS} = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 150^\circ\text{C}$)	I_{DSS}	-	10 10	μA μA
Gate Reverse Current ($V_{GS} = \pm 15 \text{ Vdc}$, $V_{DS} = 0$)	I_{GRS}	-	4.10	μA
ON CHARACTERISTICS				
Gate Threshold Voltage ($I_{DS} = 10 \text{ V}$, $I_D = 10 \mu\text{A}$)	$V_{GS(th)}$	1.0	5	Vdc
Drain-Source On Voltage ($I_D = 2.0 \text{ mA}$, $V_{GS} = 10 \text{ V}$)	$V_{DS(on)}$	-	1.0	V
On-State Drain Current ($V_{GS} = 10 \text{ V}$, $V_{DS} = 10 \text{ V}$)	$I_{D(on)}$	3.0	-	mAdc

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

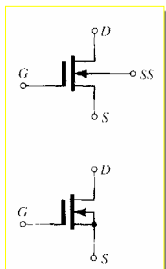
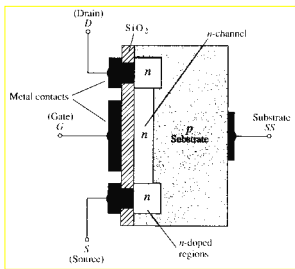
Forward Transfer Admittance ($V_{GS} = 10 \text{ V}$, $V_{DS} = 2.0 \text{ mA}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	$ y_{fs} $	1000	-	mmho
Input Capacitance ($V_{GS} = 10 \text{ V}$, $V_{DS} = 0$, $f = 140 \text{ kHz}$)	C_{iss}	-	5.0	μF
Reverse Transfer Capacitance ($V_{GS} = 0$, $V_{DS} = 0$, $f = 140 \text{ kHz}$)	C_{rss}	-	1.3	μF
Drain-Substrate Capacitance ($V_{GS(th)} = 10 \text{ V}$, $f = 140 \text{ kHz}$)	C_{oss}	-	5.0	μF
Drain-Source Resistance ($V_{GS} = 10 \text{ V}$, $I_D = 0$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	$r_{DS(on)}$	-	300	ohms
SWITCHING CHARACTERISTICS				
Turn-On Delay (Fig. 5)	t_{on}	-	45	ns
Rise Time (Fig. 6)	t_r	-	65	ns
Turn-Off Delay (Fig. 7)	t_{off}	-	40	ns
Fall Time (Fig. 8)	t_f	-	100	ns

$I_D = 2.0 \text{ mAdc}$, $V_{DS} = 10 \text{ Vdc}$,
($V_{GS} = 10 \text{ Vdc}$)
(See Figure 9; Times Circuit Determined)

DEPLETION-TYPE MOSFET

n-channel Depletion-type MOSFET

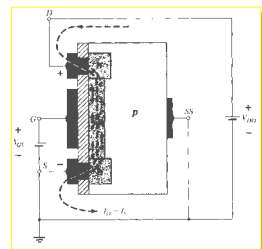
ระหว่าง Drain และ Source มี Channel วัสดุ n-type อยู่



เมื่อ $V_{GS} = 0$: I_D ไหลเนื่องจากมีพาหะอิสระ (n-channel)

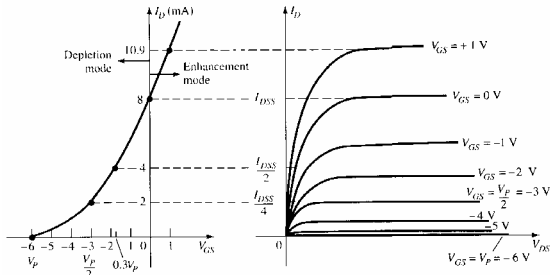
เมื่อ $V_{GS} < 0$: เหนี่ยวนำ Hole มาที่ Channel \rightarrow Hole รวมตัวกับ และ Free Electron การนำกระแสก็น้อยลง

เมื่อ $V_{GS} > 0$: การนำกระแสก็จะมากขึ้น

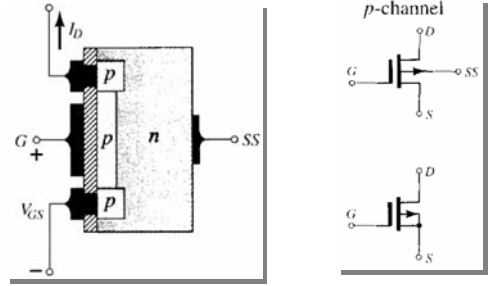


Transfer characteristics ของ n-channel depletion-type MOSFET

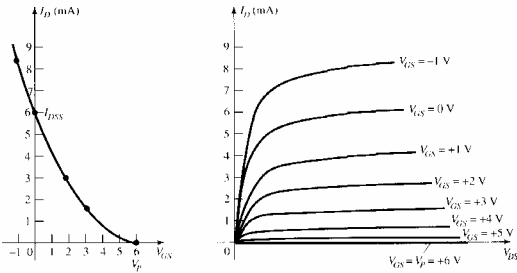
V_p : Pinch-off Voltage คือ V_{GS} ที่ทำให้ I_D หยุดไหล



p-Channel Depletion-Type MOSFET



Transfer characteristics ของ p-channel depletion-type MOSFET



แผ่นแสดงลักษณะสมบัติ (Specification Sheets)

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DS}	20	Vdc
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 10	Vdc
Drain Current	I_D	20	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	200 1.14	mW mW/°C
Junction Temperature Range	T_J	$+175$	°C
Storage Channel Temperature Range	T_{stg}	$-65 \text{ to } +200$	°C

2N3797
CASE 22-03, STYLE 2
TO-18 (TO-206AA)

**MOSFETs
LOW POWER AUDIO
N-CHANNEL - DEPLETION**

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

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Drain-Source Breakdown Voltage ($V_{GS} = -7.0\text{ V}, I_D = 5.0\ \mu\text{A}$)	$V_{BR(DSS)}$	20	25	-	Vdc
Gate Reverse Current (1) ($V_{DS} = -10\text{ V}, V_{GS} = 0$) ($V_{DS} = -10\text{ V}, V_{GS} = 0, T_A = 150^\circ\text{C}$)	I_{GRS}	-	-	1.0 200	μA
Gate-Source Cutoff Voltage ($I_D = 2.0\ \mu\text{A}, V_{DS} = 10\text{ V}$)	$V_{GS(off)}$	-	-5.0	-7.0	Vdc
Drain-Gate Reverse Current (1) ($V_{DS} = 10\text{ V}, I_S = 0$)	I_{GRD}	-	-	1.0	μA
ON CHARACTERISTICS					
Zero-Gate-Voltage Drain Current ($V_{GS} = 10\text{ V}, V_{DS} = 0$)	I_{DSS}	2.0	2.9	6.0	mAdc
On-State Drain Current ($V_{DS} = 10\text{ V}, V_{GS} = +3.5\text{ V}$)	$I_{D(on)}$	9.0	14	18	mAdc

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

Forward Transfer Admittance ($V_{DS} = 10\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1.0\text{ kHz}$)	$ y_{fs} $	2N3797	1500	2300	3000	μmhos
($V_{DS} = 10\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1.0\text{ MHz}$)		2N3797	1500	-	-	
Output Admittance ($I_{DS} = 10\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1.0\text{ kHz}$)	$ y_{os} $	2N3797	-	27	60	μmhos
Input Capacitance ($V_{DS} = 10\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1.0\text{ MHz}$)	C_{in}	2N3797	6.0	8.0		pF
Reverse Transfer Capacitance ($V_{DS} = 10\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1.0\text{ MHz}$)	C_{re}		0.5	0.8		pF
FUNCTIONAL CHARACTERISTICS						
Noise Figure ($V_{DS} = 10\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1.0\text{ kHz}, R_n = 3\text{ megohms}$)	NF		-	3.8	-	dB

สรุป FET แบบต่าง ๆ

Type	Symbol Bias Relationship	Transfer Characteristics	Input Resistance and Capacitance
JFET n-channel	$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right)^2$ 		$R_i = 10^9 \Omega$ $C_i = 1 - 100 \text{ pF}$
MOSFET n-channel type enhancement	$I_D = I_{D(on)} \left(\frac{V_{GS} - V_{GS(th)}}{V_{GS(on)} - V_{GS(th)}}\right)^2$ 		$R_i = 10^{11} \Omega$ $C_i = 1 - 100 \text{ pF}$
MOSFET n-channel type depletion	$I_D = I_{D(on)} \left(\frac{V_{GS} - V_{GS(th)}}{V_{GS(on)} - V_{GS(th)}}\right)^2$ 		$R_i = 10^{11} \Omega$ $C_i = 1 - 100 \text{ pF}$



จบ