TEXTOS UNIVERSITARIOS

Circuitos Electrónicos Básicos

Almudena López Dorado
Alejandro Martínez Arribas
Tomás Calderón Mendoza
José M. Rodríguez Ascariz

UAH

Circuitos Electrónicos Básicos

Circuitos Electrónicos Básicos

Almudena López Dorado
Alejandro Martínez Arribas
Tomás Calderón Mendoza
José M. Rodríguez Ascariz

Universidad de Alcalá
SERVICIO DE PUBLICACIONES

El contenido de este libro no podrá ser reproducido,
ni total ni parcialmente, sin el previo permiso escrito del editor.
Todos los derechos reservados.

© Universidad de Alcalá
Servicio de Publicaciones
Plaza de San Diego, s/n
28801 Alcalá de Henares
www.uah.es

ISBN: 978-84-8138-912-8
Depósito Legal: M-21009-2011

impresión y encuadernación: Imprenta de la UAH
Impreso en España

PRÓLOGO

Este libro tiene como objetivo fundamental servir como herramienta de aprendizaje para comienzo del estudio de la electrónica analógica. Como tal, está creado con la idea de ser empleado en la materia, Electrónica Básica, asignatura común de los grados de Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación, Ingeniería Electrónica de Comunicaciones, Ingeniería Electrónica de Comunicaciones, Ingeniería Telemática e Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación.

El libro está compuesto por un total de siete capítulos, a lo largo de los cuales se han pretendido presentar algunos conceptos fundamentales para el estudio teórico de la Electrónica Analógica y preparar así los cimientos de asignaturas posteriores como es el caso de la Electrónica de Circuitos del siguiente curso.

Para ello, los capítulos se han estructurado de la misma manera, incluyendo primero una introducción para situar el contexto del estudio a realizar, seguido de una explicación teórica del tema, descrita utilizando ejemplos. Al final de cada capítulo se adjunta, además, una serie de Ejercicios resueltos, seguida de una lista de Problemas Propuestos de los que se sólo se ofrece la solución final.

Contenido

CAPÍTULO 1: Transistores Unipolares.

CAPÍTULO 2: Conceptos básicos de disipación térmica en components.

CAPÍTULO 3: Circuitos con diodos.

CAPÍTULO 4: Polarización de transistores y fuentes de corriente.

CAPÍTULO 5: Principios de modelado y amplificación.

CAPÍTULO 6: Amplificación con transistores.

CAPÍTULO 7: El Amplificador Operacional.

CAPÍTULO 1
Transistores Unipolares

Contenido

1.1. INTRODUCCIÓN 3
1.1.1. Clasificación y tipos 3
1.1.2. Diferencias con los transistores bipolares, (BJT) 4
1.2. Transistores JFET 4
1.2.1. Estructura y Símbolos 4
1.2.2. Principio de funcionamiento 5
1.2.3. Definiciones de estado, zonas de funcionamiento 9
1.2.4. Ecuaciones para la corriente 9
1.2.5. Ejemplos JFET: 13
1.3. Transistores MOSFET 17
1.3.1. MOSFET de enriquecimiento o acumulación (canal n): 18
1.3.1.1. Principio de funcionamiento de los MOSFET: 18
1.3.1.2. Ecuaciones de Estado 20
1.3.1.3. Ecuaciones para la corriente I_D 20
1.3.1.4. Ejemplos MOSFET de acumulación 22
1.3.2. MOSFET de empobrecimiento o deplexión (canal n): 24
1.3.2.1. Ejemplos MOSFET de vaciamiento 25
1.4. EJERCICIOS 27

1.1. INTRODUCCIÓN

Definición: El transistor de efecto campo, o transistor FET (Field Efect Transistor) es un dispositivo semiconductor de dos uniones, en el que únicamente los portadores mayoritarios contribuyen al transporte de cargas y por tanto a generar la corriente total.

Debido este hecho a estos transistores se conocen también con el nombre de Transistores Unipolares.

En estos dispositivos, es un campo eléctrico externo el que controla el flujo de portadores en un canal de conducción, por eso son conocidos también como **Transistores de Efecto Campo**.

1.1.1. Clasificación y tipos

- Dispositivos de puerta de unión: En este caso la puerta está en contacto eléctrico con el canal y no aislada de él.

JFET (***J**unction **FET***) FET de unión. Habitualmente llamado **FET**

canal → semiconductor

puerta → semiconductor

interfaz puerta-canal → unión p-n en inversa

MESFET (**M***etal*-**S***emiconductor* **FET**)

canal → semiconductor compuesto

puerta → metal

interfaz puerta-canal → unión Schottky

- Dispositivos de puerta aislada: **IGFET (I***nsulate***-G***ate***-FET)**

MOSFET (**M***etal*-**O***xide*-**S***emiconductor*) Conocido también con nombre de **MISFET**, (**M***etal*-**I***nsulator*-**S**emiconductor). Habitualmente se le denomina **MOS**

Los hay de dos tipos:

MOS de acumulación, (enriquecimiento)

MOS de deplexión, (vaciamiento)

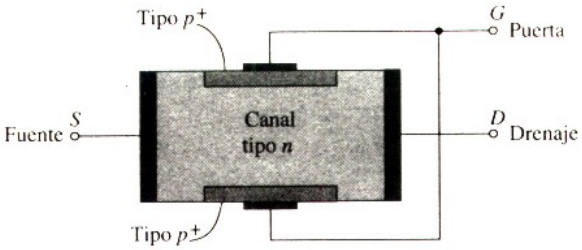
Todos ellos disponibles de canal n y de canal p

1.1.2. Diferencias con los transistores bipolares, (BJT)

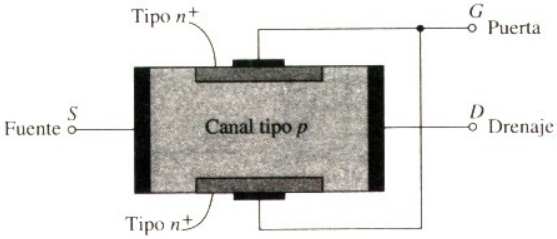
- Sólo los portadores mayoritarios, contribuyen al transporte de carga.
- La fabricación es más sencilla, tienen mayor capacidad de integración y ocupan menos espacio.
- El consumo es inferior.
- Tienen impedancias de entrada, (Ze), muy elevadas $\sim 10^4\,\Omega$, $10^{14}\,\Omega$.
- Pueden utilizarse como resistencias de carga, lo que permite implementar un sistema digital formado únicamente con MOS.
- Produce menos ruido electrónico que el transistor bipolar.
- En amplificación, producto Ganancia × Ancho de Banda (GBW) más pequeño.

1.2. Transistores JFET

1.2.1. Estructura y Símbolos



a) Estructura JFET de canal n.



b) Estructura JFET de canal p.

El transistor JFET está construido con:

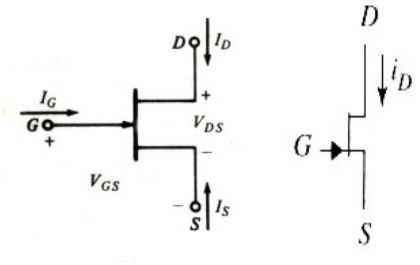
❖ una oblea de semiconductor tipo n, con dos zonas difundidas tipo p, fuertemente dopadas, (canal N).

❖ una oblea de semiconductor tipo p, con dos zonas difundidas tipo n, fuertemente dopadas, (canal P).

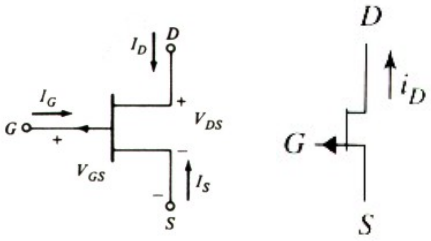
En estos dispositivos con una diferencia de tensión entre el drenador (**D**) y la fuente (**S**), $\mathbf{V_{DS}}$, los portadores mayoritarios, electrones en el canal n y huecos en el canal p, forman una corriente $\mathbf{I_D}$, entre la S y el D.

Dicha corriente se controla mediante la puerta (**G**), pues con $\mathbf{V_{GS}}$, se puede regular también la anchura del canal

Símbolos



a) Símbolo JFET de canal n.



b) Símbolo JFET de canal p.

1.2.2. Principio de funcionamiento

Se realizará el estudio sobre un transistor **JFET** de **canal n**, cambiando el signo de las tensiones y sentido de las corrientes, cuando se trate de un JFET de canal p.

Para realizar el estudio se supondrán condiciones normales de polarización y se analizará la estructura presentada en la figura 1.

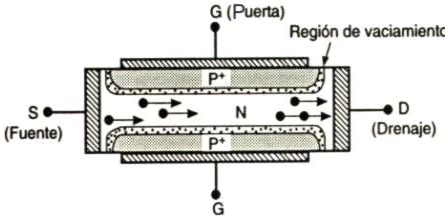


Figura 1. Estructura básica del **JFET.**

Se dan las condiciones de polarización estándar en el JFET, cuando las puertas superior e inferior se unen entre si, $V_G \leq 0$ y $V_D \geq 0$ como puede verse en la figura2.

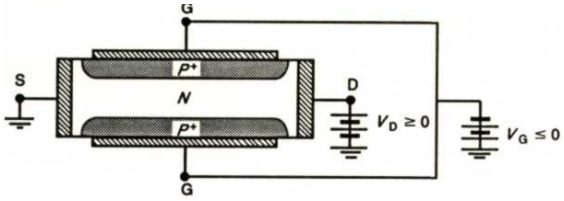


Figura 2. Condiciones de polarización supuestas en el análisis cualitativo.

Con $V_G \leq 0$ las uniones p-n estarán siempre en polarización inversa o nula.

Así mismo $V_D \geq 0$ asegura que los electrones puedan desplazarse de la fuente al drenador.

Para comprender el funcionamiento del dispositivo, se realizará un análisis por partes donde se plantearán unas condiciones iniciales de tensión en los terminales y se estudiará lo que ocurre dentro del dispositivo.

- **<u>Primer estudio</u>**: $V_D = V_S = 0$ V ($V_{DS} = 0$ V)

Con estas condiciones de polarización el dispositivo está en equilibrio, Figura3, sólo se aprecian las zonas de vaciamiento.

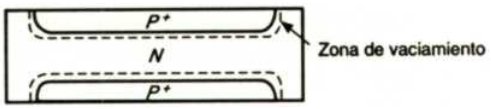


Figura 3. Zonas de vaciamiento en el canal.

Con $V_{GS} \leq 0$ V las uniones GS y GD estarán en inversa, se ensanchan las zonas de vaciamiento lo que reduce la sección del canal, haciéndose más difícil el paso de corriente, Figura4.

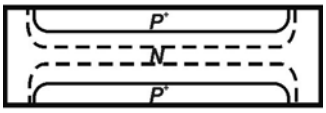


Figura 4. Reducción del canal.

Existe un valor $V_{GS} = V_P$ para el que el canal se habrá estrangulado, Figura 5.

V_P<0 V para un JFET de canal n.

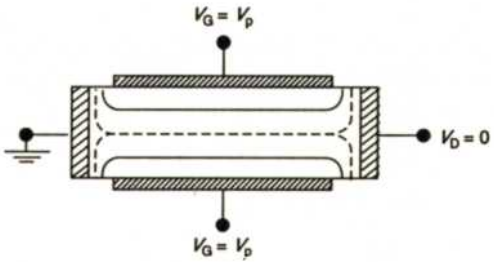


Figura 5. Canal estrangulado.

- **<u>Segundo estudio</u>**: $V_G = V_S = 0$ V ($V_{GS} = 0$ V)

Se comienza con el terminal de drenador también a masa, Figura 6 y se irá incrementando la tensión $V_{D,}$ para conocer las diferentes zonas de funcionamiento del dispositivo.

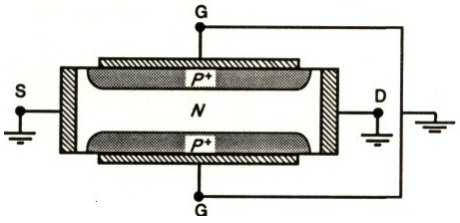


Figura 6. Dispositivo en equilibrio.

A continuación se introduce una pequeña tensión V_D, Figura 7.

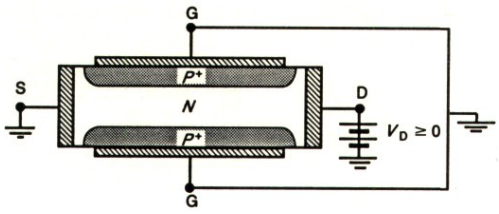


Figura 7. Tensión pequeña sobre el drenador.

Comienza el tránsito de electrones de la fuente al drenador, apareciendo por tanto la corriente de drenador I_D, que circula en este caso, del drenador a la fuente, Figura8.



Figura 8 Detalle del canal de conducción

Las uniones DS y GS están en inversa, pues $V_{DS} > 0$ V.

Se ensanchan las zonas de vaciamiento y se reduce el tamaño del canal.

El canal actúa como una resistencia **R_{DS}** al paso la corriente **I_D**, que será controlada por el valor de la tensión **V_{DS}**.

Recordando la expresión de la ley de Ohm:

$$V_{DS} = I_D \cdot R_{DS}$$

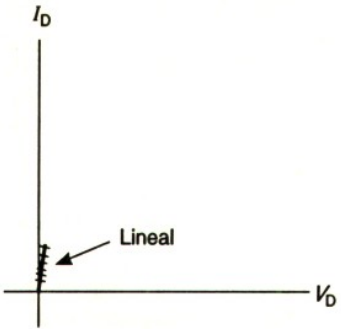


Figura 9. Característica I_D_V_D

La representación de esta ecuación, nos ofrece la idea intuitiva del canal actuando como una "resistencia lineal", Figura 9.

Aumentando más, valor de la tensión V_D

las zonas de vaciamiento crecen de forma no uniforme, más cuanto más cerca del drenador, aunque el dispositivo sigue en la misma zona de funcionamiento, Figura 10.

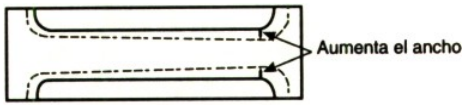


Figura 10. Aumento de las zonas de vaciamiento.

Al estrecharse el canal el paso de corriente I_D, se hace mas difícil.

La pendiente de la recta de la I_D disminuye, Figura 11.

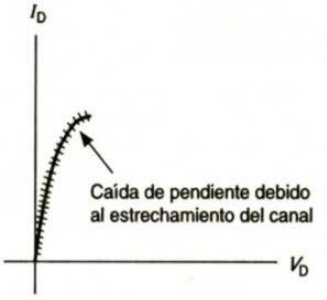


Figura 11. Disminución de la pendiente de la recta de I_D.

Si se sigue aumentando la V_D el dispostivo entra en una nueva zona de funcionamiento.

Las zonas de carga especial crecen tanto que llegan a tocarse cerca del drenador con lo que el canal se "ESTRANGULA", Figura 12.

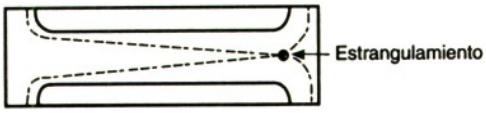


Figura 12. EL canal se estrangula cerca del drenador.

Esto ocurre para una tensión $V_{DS} = V_{DSsqt}$

La pendiente de la curva de I_D se hace cero, lo que marca el comienzo de la zona de saturación, Figura13.

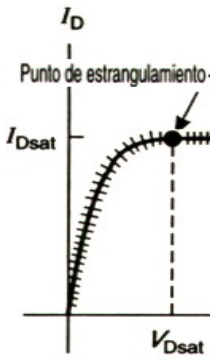


Figura 13. Comienzo saturación

Para tensiones $V_D > V_{Dsat}$.
La característica se satura, es decir permanece más o menos constante en un valor, $I_{Dsat,}$ Figura 14.

$$\mathbf{I_D = I_{Dsat}}$$

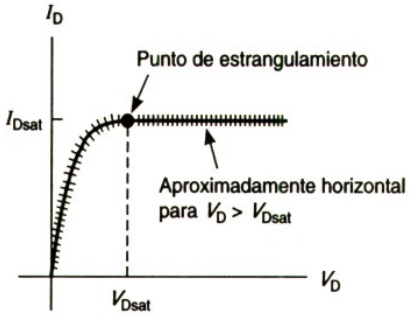


Figura 14. La característica permanece constante tras estrangularse el canal.

Para entender porqué I_D no se hace cero tras estrangularse el canal, examinamos el gradiente de tensiones a lo largo de éste, Figura 15.

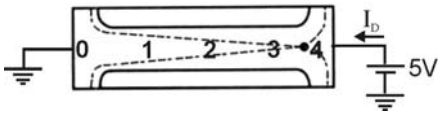


Figura 15. Canal estrangulado con la distribución de tensión a lo largo de éste.

Con una fuente de 5 V en el terminal de drenador, se consigue estrangular el canal.

La corriente $I_{D,}$ es la que se encarga de distribuir la tensión desde el drenador a la fuente.

Si la corriente I_D fuese igual a cero tras estrangularse el canal, no existiría ese gradiente de tensiones por lo que no se ensancharían las zonas de vaciamiento y el canal **NO** estaría **ESTRANGULADO,** por lo que se llega a que la hipótesis de partida es falsa. Es decir la corriente I_D es distinta de cero.

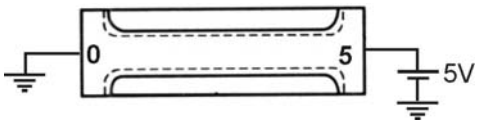


Figura 16. Explicación de que la I_D es distinta de cero.

Queda aclarado por tanto, que tras estrangularse el canal cuando $V_{DS} = V_{Dsat}$

la corriente $I_D = I_{Dsat.}$

Para tensiones muy elevadas de $V_{D,}$ el dispositivo entra en zona de ruptura.

1.2.3. Definiciones de estado, zonas de funcionamiento

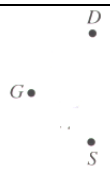
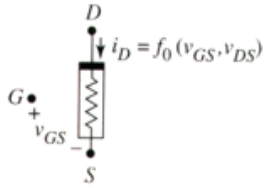
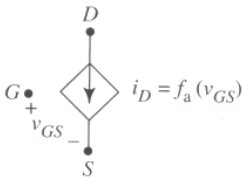
Para el JFET de canal n:

CORTE: $V_{GS} \leq V_P \leq 0$

CONDUCCIÓN: $V_{GS} \geq V_P$

- **ÓHMICA** $V_{GD} \leq V_P \Rightarrow V_{DS} \leq V_{GS} - V_P$
- **ACTIVA** $V_{GD} \geq V_P \Rightarrow V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$

1.2.4. Ecuaciones para la corriente

Estado	Ecuación	Circuito Equivalente	Modelo en gran señal
CORTE	$I_D = 0$	Circuito abierto	
ÓHMICO	$I_D = \frac{k}{2}\left[2(V_{GS} - Vp)V_{DS} - V_{DS}^2\right]$ $R_{DS_{OHM}} = \frac{1}{\frac{k}{2}\cdot(V_{GS} - V_P)}$ ***1)**	Resistencia controlada por tensión	
SATURACIÓN o ACTIVA	$I_D = \frac{k}{2}\cdot(V_{GS} - V_P)^2$	Fuente de corriente controlada por tensión	

- El transistor estará en **CORTE** cuando $V_{GS} < Vp$ siendo entonces la corriente $I_D = 0$.

Del estudio físico del componente se obtiene la ecuación que explica el comportamiento del JFET en conducción.

$$\mathbf{I_D = \frac{k}{2}\left[2(V_{GS} - Vp)V_{DS} - V_{DS}^2\right]}$$

- En la región **ACTIVA** o de **SATURACIÓN**:

$$I_D = \frac{k}{2}\left(V_{GS} - V_p\right)^2$$

Representando la ecuación de I_D frente a V_{GS} obtendremos la Función de Transferencia del transistor, Figura 17.

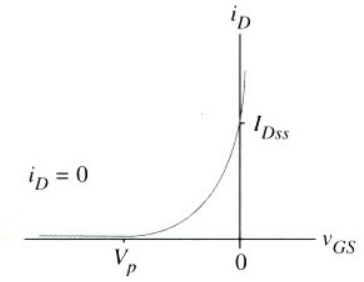


Figura 17. Curva característica del JFET de can**al n**

para valores de $V_{GS} < V_P$ la zona de funcionamiento es de **CORTE**.

Se define el parámetro $\mathbf{I_{SS}}$ como la corriente de saturación de drenador cuando la $V_{GS}=0$

$$I_{D_{sat}} = \frac{k}{2}\left(V_{GS} - V_P\right)^2\Big|_{V_{GS}=0} \longrightarrow I_{D_{SS}} = \frac{k}{2}V_P^2$$

A partir de la definición de I_{DSS} se puede obtener la ecuación de Shockley:

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

- En la región **ÓHMICA**:

Se puede trabajar con dos aproximaciones dependiendo del valor de V_{DS}, vease las figuras de la región óhmnica.

1. Si V^2_{DS} se puede despreciar, podrá hacerse cuando tenga un valor de un orden de magnitud más pequeño que el otro sumando, la corriente I_D queda:

$$\mathbf{I_D = \frac{k}{2}\left[2\left(V_{GS} - Vp\right)V_{DS}\right] = \frac{1}{R_{DS_{OHM}}}V_{DS}}$$

y la resistencia con valor:

$$\mathbf{R_{DS_{OHM}} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{1}{k\left(V_{GS} - Vp\right)}}$$

2. Si V_{DS} es grande, se toma el valor en el límite con la saturación: $V_{DS} = V_{GS} - V_P$

   con lo que $I_D = I_{DSAT}$ y $\mathbf{R_{DS_{OHM}} = \frac{V_{DSsat}}{I_{Dsat}} = \frac{V_{GS} - V_p}{\frac{k}{2}(V_{GS} - V_p)^2} = \frac{1}{\frac{k}{2}(V_{GS} - V_p)}}$

Se han obtenido dos valores para la resistencia de la región óhmica que cumplen

$R_{DS\ OHM\ 2} = 2 \cdot R_{DS\ OHM\ 1}$ Se tomará para trabajar por defecto la opción2, ***1)**.

CURVAS CARACTERÍSTICAS JFET canal n

En las gráficas de salida de observan distintas zonas de funcionamiento del dispositivo:

Zona óhmica, zona de saturación y zona de ruptura.

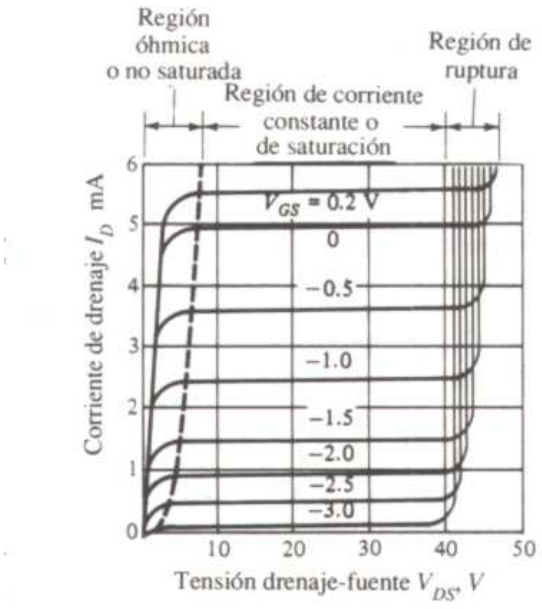


Figura18. Ejemplo real de las características de salida de un JFET de canal **n**