الفصل الثامن

ترانزستور تأثير المجال
(Field-Effect Transistor)

يعتبر ترانزستور تأثير المجال من اهم العناصر الإلكترونية في الوقت الراهن حيث يمتاز ترانزستور تأثير المجال عن ترانزستور ثنائي القطبية الوصلي (BJT) في عدة جوانب أهمها:

1. سهولة تصنيعه وكذلك صغر المساحة التي يشغلها لذلك فانه اكثر استعمالاً وملائمة في صناعة الدوائر المتكاملة والتي لها دور كبير في التطور الذي شهده علم الإلكترونيات في هذا العصر، وكذلك تكون أطول عمراً واكبر كفاءة.
2. تمتلك ترانزستورات تأثير المجال ممانعة إدخال عالية جداً (عادة ما تكون اكبر من 100MΩ) في حين ان ترانزستورات ثنائية القطبية لا يمكنها ان تحقق ممانعة إدخال عالية جداً فهي في احسن الأحوال لا تحقق سوى بضعة (MΩ).
3. لترانزستورات تأثير المجال كسب قدرة عالي جداً.

4. يكون أقل عرضة للتأثيرات الحرارية، في حين ان ترانزستورات ثنائية القطبية تتأثر بصورة اكبر بتغير درجات الحرارة والتي تحد من إمكانية الترانزستور في دوائر التضخيم.
5. يكون أقل توليداً للضوضاء بالمقارنة مع ترانزستور ثنائي القطبية.
6. يمكن استعماله عند الترددات العالية وذلك لان حركة الحاملات في القناة لا تتم عن طريق الانتشار بل في مجال معجل في حيث تعاني ترانزستورات ثنائية القطبية من مشكلة المتسعات الشاردة والتي تحد من إمكانية الترانزستور ثنائي القطبية في الترددات العالية.

ان أساس عمل ترانزستور تأثير المجال هو التحكم في قيمة التيار الخارج بواسطة التأثير الذي يحدثه المجال الكهربائي الناتج عن تسليط جهد على مسار ذلك التيار ولذلك سميت بترانزستور تأثير المجال ويسمى أيضا بالترانزستور الأحادي القطبية وذلك لان التيار الناتج يعتمد على حركة نوع واحد من حاملات الشحنة (اما الكترونات حرة أو فجوات) وذلك حسب نوع القناة (channel) المستعملة.

هناك نوعان من ترانزستور تأثير المجال وهي:

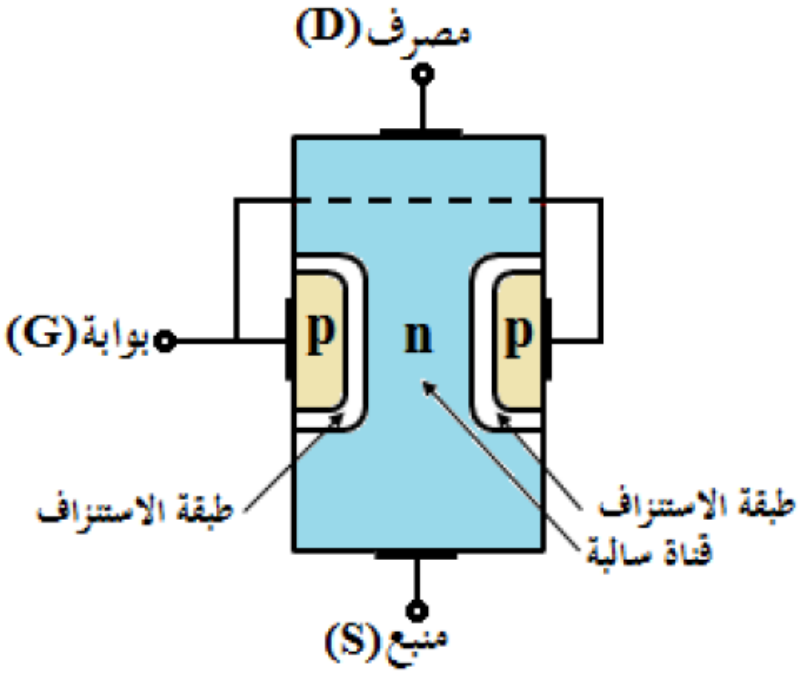
1- ترانزستور تأثير المجال الوصلي Junction Field-Effect Transistor (JFET)
2- ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني Metal-Oxide- (MOSFET) Semiconductor FET

يعمل كلا النوعين على نفس الأساس وهو التحكم بالتيار بواسطة مجال كهربائي إلا ان لهما تركيب و الخواص مختلفة، لذا فسنقوم بدراسة كل نوع وكما يلي.

2.8 ترانزستور تأثير المجال الوصلي (JFET)

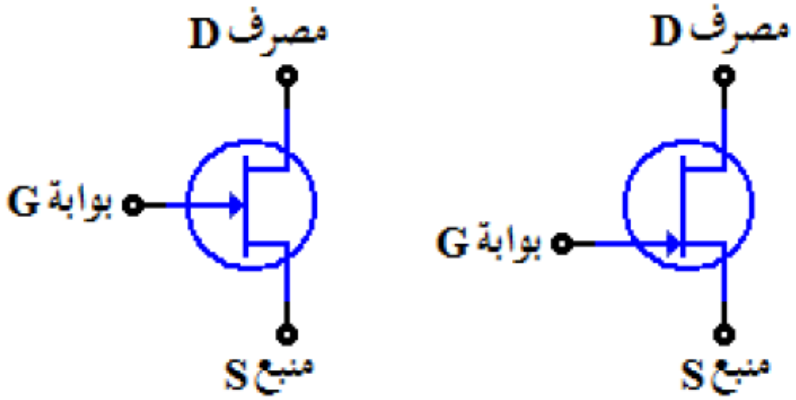
هناك نوعان من ترانزستور تأثير المجال الوصلي وهما ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة (n-channel JFET) وترانزستور تأثير المجال ذي القناة الموجبة (p-channel JFET) وذلك تبعاً لتركيب وخصائص كل نوع.

الشكل (8–2) يوضح تركيب ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة، حيث يلاحظ انه يتكون من لوح شبه موصل من النوع السالب غالباً ما يكون من السليكون إلا في حالات خاصة (في تطبيقات الترددات العالية مثلاً) فيكون مصنوعاً من الكاليوم ارسنايد (GaAs) ويسمى ذلك اللوح بالقناة channel وتسمى النهاية السفلى من القناة بالمنبع Source اما النهاية العليا من القناة فتدعى بالمصرف Drain . يلاحظ كذلك وجود منطقتين من نصف موصل من نوع مخالف لمادة اللوح وعلى جهتي القناة وتدعى كل جهة بالبوابة وغالباً ما تكون الجهتين متصلتين ببعض داخلياً. كما هو الحال في ثنائي شبه الموصل تنشأ بين جهتي البوابة والقناة منطقة استنزاف كما هو موضح بالشكل السابق. في حالة ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة الموجبة تكون القناة من شبه موصل من النوع الموجب بينما تصنع البوابة من شبه موصل من النوع السالب.



شكل (8–2) تركيب ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة

في حالة كون التشويب منتظم على طول القناة والبوابة فانه بالإمكان استبدال المنبع مع المصرف بحيث يمكن استعمال أي نهاية للقناة كمنبع واستعمال النهاية الثانية كمصرف، وفي هذه الحالة لا يميز الرسم التخطيطي بينهما، اما في حالة كون التشويب غير متماثل يكون سهم البوابة اقرب لطرف المنبع. الشكل (8–3) يوضح رمز ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة المتماثلة وغير المتماثلة.



شكل (8–3) رمز ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة المتماثلة وغير المتماثلة

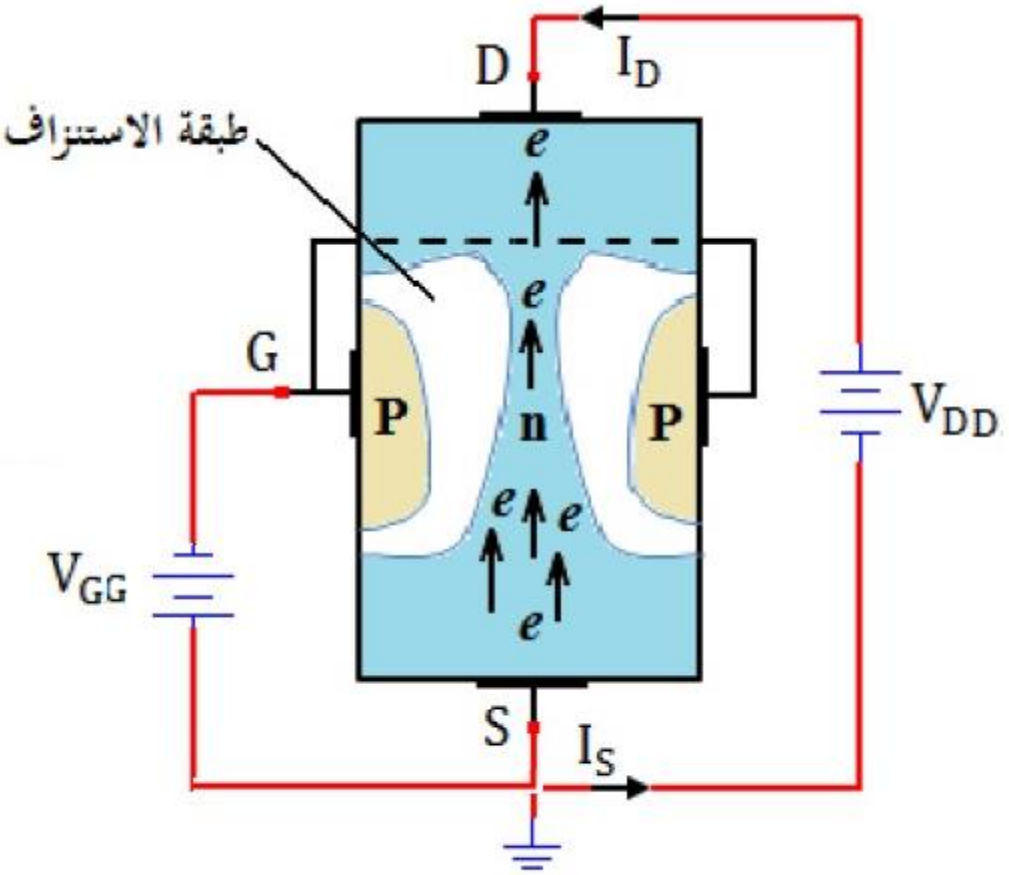
3.8 مبدأ عمل ترانزستور تأثير المجال الوصلي (JFET)

سنقوم بدراسة خواص ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة، في البداية نفرض ان المنبع والبوابتين عند الجهد الصفري

أي ان (V_{GS})يساوي صفر وهذه الحالة تسمى بحالة قصر البوابة (Shorted gate)

وندرس التأثير الذي يسببه تسليط جهد موجب صغير على المصرف كما هو موضح بالشكل (8-4).

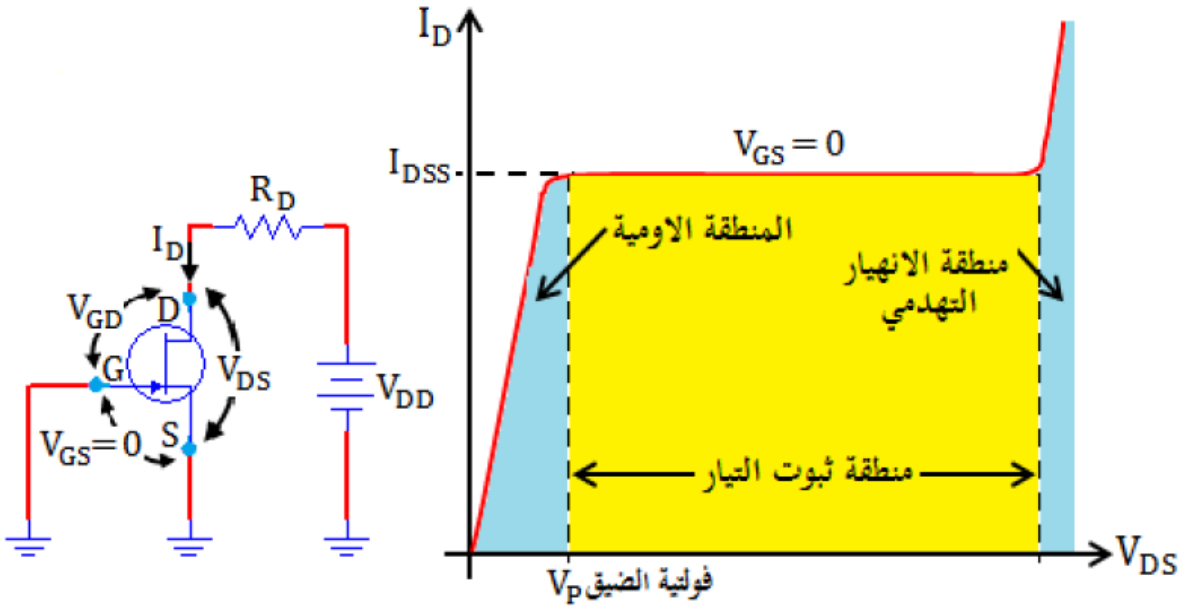
ان الجهد الموجب المسلط بين المصرف D و المنبعS يؤدي إلى سريان الإلكترونات من المنبع إلى المصرف وقيمة التيار المار يعتمد في البداية على قيمة الجهد المسلط وكذلك على قيمة مقاومة القناة (قانون أوم). حيث يزداد تيار القناة بزيادة الجهد المسلط V_{DS}.



شكل (8-4) مبدأ عمل ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة

:

من جهة أخرى فان تسليط جهد موجب على المصرف سيؤدي إلى تسليط جهد انحياز عكسي على وصلة pn التي يكونها كل من المصرف والمنبع مع البوابتين وبزيادة ذلك الجهد يزداد عرض منطقة الاستنزاف والذي يكون على حساب عرض القناة الذي يمر خلاله التيار من المنبع إلى المصرف وبالنتيجة تزداد مقاومة القناة وهذا يدفع إلى التقليل من تيار المصرف I_D كلما زاد الجهد V_{DS} المسلط. الشكل (8–5) يوضح منحنى تغير تيار المصرف مع فولتية المصرف في حالة تأريض البوابة.



الشكل (8–5) منحنى تغير تيار المصرف مع فولتية المصرف في حالة تأريض البوابة

يلاحظ من الشكل (8–5) انه لفولتيات المصرف V_{DS} الصغيرة يكون تأثير منطقة الاستنزاف بسيطاً ويظهر سلوك أومي، وبزيادة فولتية المصرف تتوسع منطقة الاستنزاف بصورة مؤثرة على قيمة التيار المار عبر القناة إلى ان تتوقف الزيادة في تيار المصرف عند فولتية معينة تسمى فولتية الضيق V_P (pinch-off voltage).

فولتية الضيق: وهي فولتية المصرف التي يكون فوقها تيار المصرف ثابت تقريبا.

يلاحظ انه في منطقة ثبوت التيار يتساوى التأثير الاومي مع تأثير طبقة الاستنزاف ونتيجة لذلك يبقى قيمة تيار المصرف ثابتاً لفولتية تساوي أو اكبر من فولتية الضيق ويرمز لذلك التيار بالرمز (I_{DSS}) والذي يمثل قيمة التيار في منطقة ثبوت التيار وتمثل اعظم قيمة للتيار في تلك المنطقة، و تقابل منطقة ثبوت التيار لترانزستور تأثير المجال الوصلي المنطقة الفعالة لترانزستور ثنائي القطبية الوصلي (BJT).

6.8 مضخم ترانزستور تأثير المجال الوصلي

ان مبدأ عمل مضخم ترانزستور تأثير المجال الوصلي يقوم على حقيقة كون الفولتية الإدخال المسلطة بين طرفي المنبع–البوابة تسيطر على قيمة التيار المار بين طرفي المصرف–المنبع، هناك عدة معاملات تحدد سلوك ترانزستور تأثير المجال في دوائر التضخيم وهي:

المواصلة التبادلية:(g_m) Transconductance

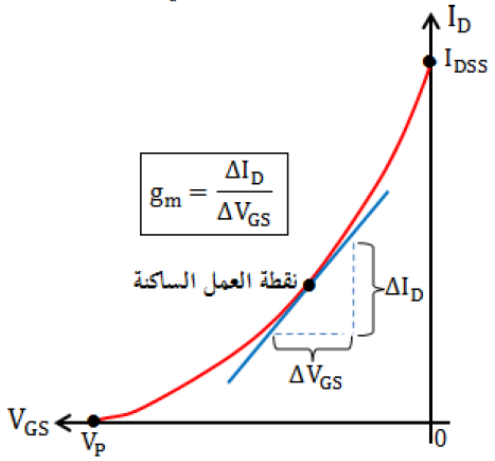
وهي نسبة تغير تيار المصرف الى التغير المسبب في فرق الجهد بين البوابة والمنبع، وذلك عند ثبوت فرق الجهد بين المصرف والمنبع. وحداتها سيمنس (Siemens). أي مقلوب الاوم.

وان اعظم قيمة للموصلية التبادلية ,عندما تكون $V_{GS}=0$

وعندها يعبر عن g_m بالتعبير g_{mo}:

$$g_m = \left.\frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}\right|_{V_{DS}=\text{Constant}}$$

في الشكل (8–11) الذي يوضح منحنى الخصائص الانتقالية لترانزستور تاثر المجال
يلاحظ ان معامل التوصيلية الانتقالية يمثل ميل المنحني عند نقطة العمل الساكنة.



شكل (8–11) علاقة معامل التوصيلية الانتقالية بمنحى الخواص الانتقالية

$$g_{mo} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}$$

بالاستفادة من العلاقة الاخيرة يمكننا كتابة الصيغة الخاصة بالتوصلية التبادلية بالصيغة:

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

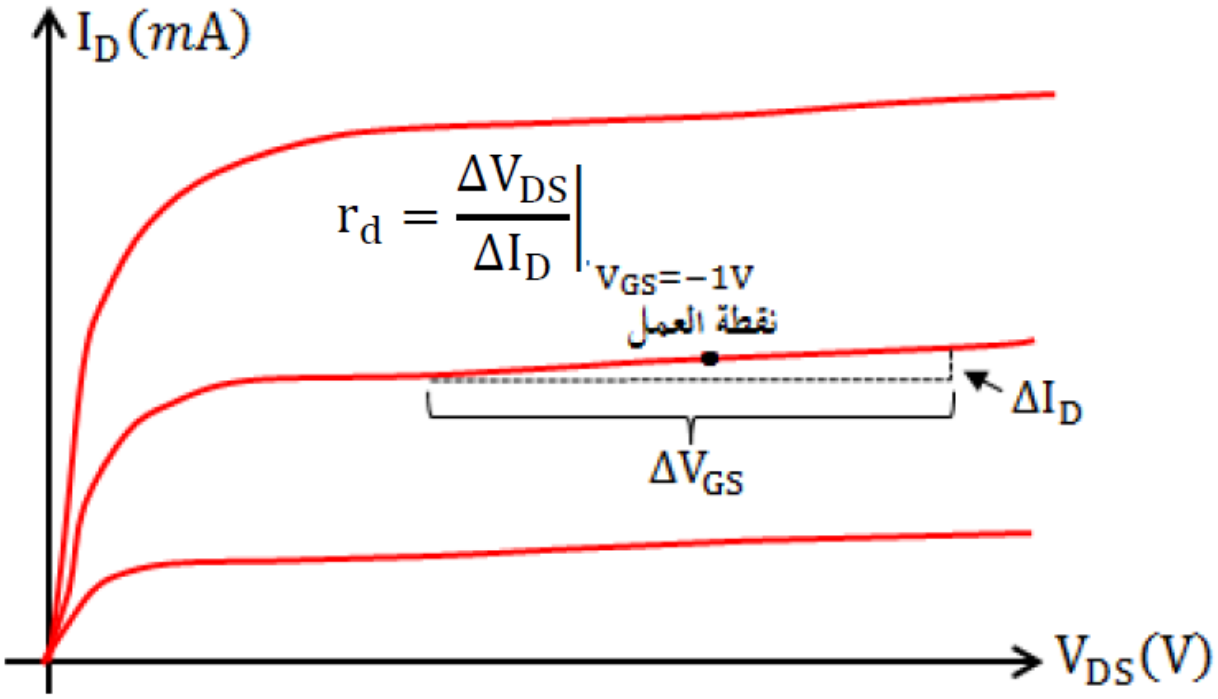
اما توصيلية الإخراج(y_{os}) فهي مقلوب ممانعة الإخراج : أي ان

$$Z_o = r_d = \frac{1}{y_{os}}$$

مقاومة المصرف (rd) : او تسمى ممانعة الإخراج (Zo) :

وهي النسبة بين التغير في فرق الجهد (V_{DS}) الى مقدار ما يؤديه من تغير في تيار المصرف (I_D) وذلك عند ثبوت فرق الجهد (V_{GS}).

$$r_d = \left.\frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D}\right|_{V_{GS}=\text{constant}}$$



شكل (8–12) تعريف ممانعة الاخراج على منحنيات الاخراج

معامل التكبير (μ) :هو النسبة بين التغير في جهد المصرف –المنبع الى التغير في جهد البوابة –المنبع عند ثبوت تيار المصرف:

$$\mu = \frac{\Delta VDS}{\Delta VGS}\Big|_{ID = constant}$$

وهناك علاقة تربط بين الثوابت الثلاثة وهي:

$$\mu = r_d \cdot g_m$$

ممانعة الإدخال لترانزستور تأثير المجال (Z_i)

ان ممانعة الادخال لترانزستور تأثير المجال عالية جداً (تكون عادة بحدود1000MΩ) بحيث يمكن اعتبار دائرة الادخال بمثابة دائرة مفتوحة، لذا يمكن التعبير عن ممانعة الادخال لترانزستور بالصيغة:

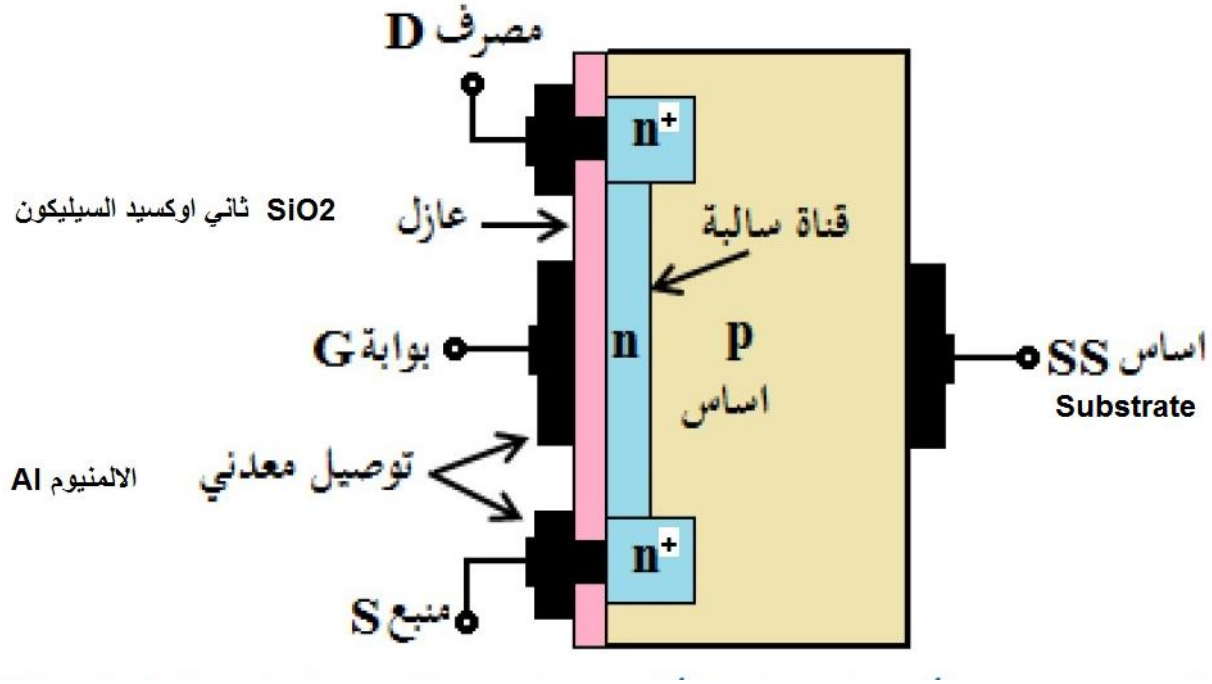
$$Z_i = \infty\ \Omega$$

7.8 ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني MOSFET

هو النوع الثاني من ترانزستور تأثير المجال ويختلف عن ترانزستور تأثير المجال الوصلي (JFET) بكونه لا يحتوي على وصلة pn وبدلاً عن ذلك تكون البوابة معزولة عن القناة بطبقة رقيقة من مادة عازلة (غالباً ما تكون ثاني أوكسيد السليكون SiO_2)، ولذلك يسمى MOSFET أحيانا بترانزستور تأثير المجال ذي البوابة المعزولة IGFET (Insulated-Gat FET).

تركيب ترانزستور تأثير المجال ذي الاوكسيد المعدني

Metal Oxide Semiconductor FET (MOSFET)



ان أساس تركيب الترانزستور هو عبارة عن لوح سيليكون من النوع (P) , حيث يتم ترسيب بقية أجزاء الترانزستور على هذه الطبقة ومن هنا جاءت التسمية بطبقة الأساس.

يكون منسوب التطعيم في طبقة الأساس منخفضا بالنسبة الى منسوب التطعيم في المنطقتين السالبتين التي يتم نشرها على يتم نشرها على هذه الطبقة بتركيز عال من الالكترونات وقد رمز لهما ب (n^+) وتقوم هاتان المنطقتان مقام المنبع والمصرف وتكون المسافة التي تفصل بينهما في حدود بضع مايكرون.

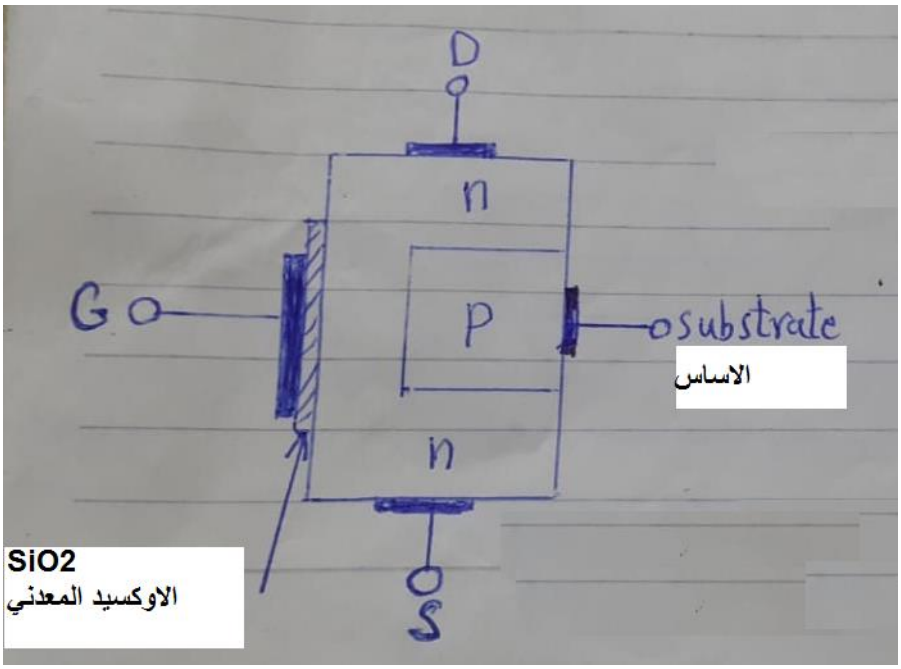
كذلك يتم نشر طبقة سالبة ذات منسوب تطعيم واطئ (n) بين المنبع والمصرف تعرف بالقناة وتكون ذات توصيلية الكترونية. اما على سطح القناة فتوجد طبقة عازلة من ثاني أوكسيد السيليكون (SiO_2) يكون سمكها في حدود عشرة مايكرون.

اما البوابة فتوجد فوق هذه الطبقة العازلة وتكون على هيئة غشاء معدني رقيق الالمنيوم عادة , بعدها يتم قطع العازل وعمل التوصيل المعدني الخاص بالمنبع والمصرف.

تركيب ترانزستور تأثير المجال ذي الاوكسيد المعدني:

Metal Oxide Semiconductor FET (MOSFET)

الشكل يمثل الترانزستور MOSFET

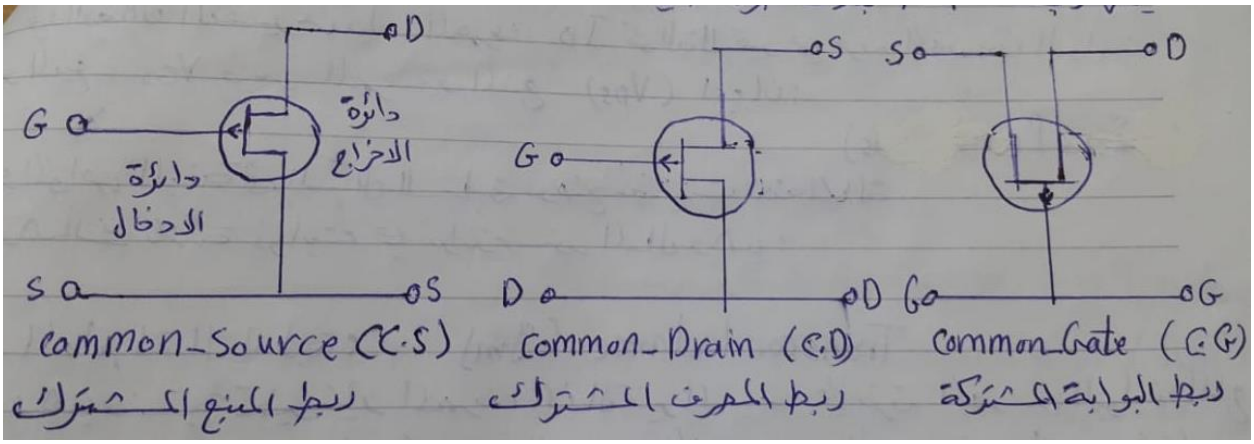


ويقسم الترانزستور ذي الاوكسيد المعدني من حيث أسلوب العمل الى نوعين هما:

ا-التعزيزي

ب-الاستنزافي

وكما هو الحال في الترانزستور الثنائي القطبية فان ترانزستور تأثير المجال له ثلاث طرق للربط اعتمادا على الطرف المشترك المربوط.



مقارنة بين ترانزستور تاثير المجال (JFET) and (MOSFET)

MOSFET	JFET
1- يمتلك بالإضافة الى المنبع والمصرف والقناة والبوابة طبقة تسمى الأساس.	1-يمتلك تركيب يتضمن المنبع والمصرف والقناة والبوابة.
2-تركيب البوابة يتضمن وجود طبقة من	2-تكون البوابة غير معزولة عن القناة أي

أوكسيد عازل وغشاء معدني يتم ترسيبه فوق العازل, و بهذا تكون البوابة معزولة عن القناة. وبسبب عدم وجود هذه الوصلة (PN) فانه لايوجد قيود على قطبية جهد البوابة , حيث انه يمكن تسليط جهد موجب على بوابة الترانزستور مع بقاء تيار البوابة صفر	يوجد تركيب الوصلة PN .
3-نظرا لكون البوابة معزولة لذا فانه يمتلك ممانعة ادخال عالية جدا في حدود 10^{14} اوم	3-يمتلك ممانعة ادخال في حدود 10^{10} اوم
4-صغر مساحته وسهولة تصنيعه وكذلك عدم تاثره بالمؤثرات الخارجية لكونه معزولا	4-يشغل مساحة اكبر و صعوبة اكبر في التصنيع.

مقارنة بين ترانزستور تاثير المجال (FET) وترانزستور ثنائي القطبية(BJT)

FET(Field Effect Transistor)	BJT(Bipolar Junction Transistor)
1- المنبع(S) :هو الطرف الذي تدخل من خلاله حاملات التيار الأغلبية سواء اكانت الكترونات او فجوات. ويعرف التيار الداخل اليه او الخارج منه بتيار المصرف (Source) I_s	1-يناظر تيار الباعث (I_E)
2-المصرف (D) :هو الطرف الذي يخرج منه حاملات التيار الأغلبية مولدة تيار يعرف بتيار المصرف ID(Drain)	2- يناظر تيار الجامع (I_C)
3 – البوابة (G) Gate :تصنع من مادة معاكسة لنوع المنبع والمصرف و تركب على وجهي القناة بطريقة الانتشار والسبك ويكون منسوب التطعيم في البوابة عادة اكبر منه في القناة لذلك كثير ما نلاحظ وجود علامة + مضافة الى P (P^+) وعلامة – الى	3- يناظر طرف القاعدة (B -Base).

(n^-) لتشير لذلك.	
4- التيار يسري خلال القناة.	**4-التيار يسري خلال (PN)**
5- ان الجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) قد اختير بحيث تكون البوابة منحازة عكسيا وبذلك فان تيار صغيرا سوف يسري في طرف البوابة بحيث تكون قيمته كتقريب اولي مساوي للصفر.	**5- تكون القاعدة مع الباعث منحازة اماميا ويسري تيار اكبر.**
6- يعمل كجهاز منضبط للجهد حيث يسيطر جهد الإخراج وحده على تيار الإخراج.	**6-يعمل كجهاز منضبط للتيار ذلك لان تيار الادخال يتحكم بتيار الإخراج.**
7-مقاومة الادخال تقترب من المالانهاية وهي تساوي عدة ميكا اوم.	**7-مقاومة ادخال واطئة.**
8- سيطرة اقل على تيار الإخراج لذلك فانه اقل حساسية للتغيرات في جهد الادخال.	**8- سيطرة اعلى على تيار الإخراج –كما جاء في الفقرة 6**
9- يمكن استبدال المنبع مع المصرف بحيث يمكنك استعمال اية نهاية كمنبع واستعمال النهاية الأخرى كمصرف.	**9- لا يمكن استبدال الجامع بالباعث. لان الجامع اكبر حجما واقل تطعيما من الباعث.**
10-طريقة العمل تعتمد على حاملات الشحنة الأكثرية أي الغالبية.	**10- طريقة العمل تعتمد على حاملات الشحنة الأكثرية والأقلية.**
11- طريقة التصنيع اسهل واقل حجما في الدوائر المتكاملة.	**11-طريقة التصنيع اكثر صعوبة والحجم اكبر.**
12-ضوضاء اقل.	**12-ضجيج أي ضوضاء اكثر.**
13-لا يتأثر بالإشعاعات وله استقرار حراري عالي.	**13-اقل استقراريه حرارية.**
14-من مساوئه انه اقل جودة من (BJT) عندما يستخدم في تضخيم –أي تكبير الإشارات ذات الترددات العالية.	**14-اكثر جودة في الترددات العالية.**

مسائل على ترانزستور تأثير المجال FET

س1: ترانزستور تاثير المجال له V_P=-4, I_{DSS}=10mA : اوجد ما يلي:

ا-اقصى قيمة للتوصيلية الانتقالية.

ب-قيمة التوصيلية الانتقالية عند (V_{GS}=-2 V).

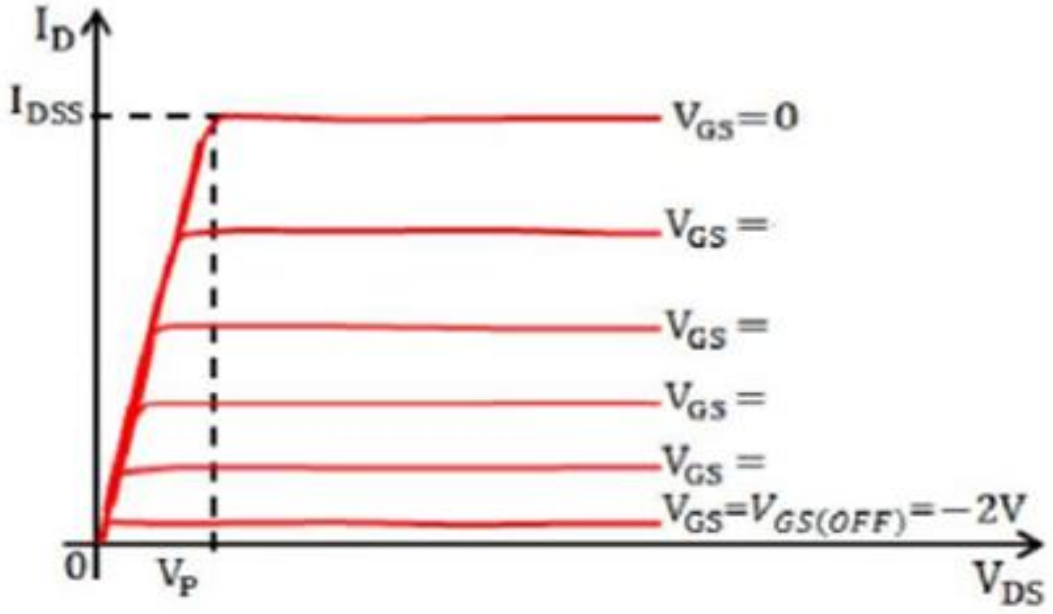
الحل/ بتطبيق القانونين :

$$g_{mo} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}$$ **(g_{mo} أعظم توصيلية تبادلية)**

بالاستفادة من العلاقة الاخيرة يمكننا كتابة الصيغة الخاصة بالتوصلية التبادلية بالصيغة:

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

س ٢/: افرض ان JFET له I_{DSS}=4 mA, $V_{GS(OFF)}$=-2 Volt, ,VGS=-1V , اوجد قيمة تيار المصرف:



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

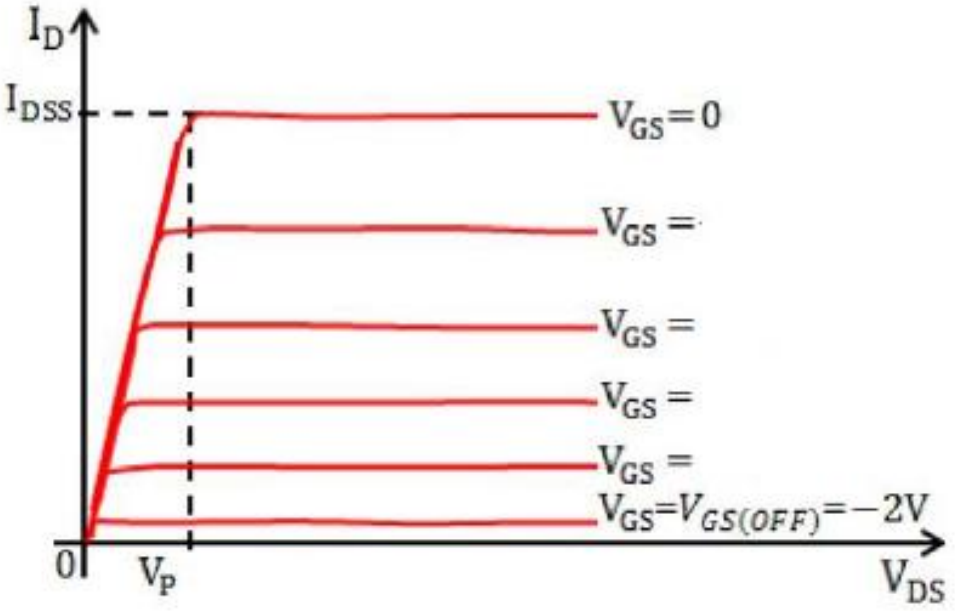
$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{-1}{-2}\right)^2$$

$$I_D = 0.004\left(1 - \frac{-1}{-2}\right)^2$$

I_D=0.004 X$(1.5)^2$

I_D=0.009 mA

س٣/ : افرض ان JFET له I_{DSS}=8.4 mA, V_{GS}=-1 Volt, ,Vp=-3V , اوجد قيمة تيار المصرف:



العلاقة التي تربط بينهما مهمة جداً، الشكل يوضح منحنى العلاقة بين جهد البوابة وتيار المصرف والذي يسمى منحنى الخصائص الانتقالية. ان العلاقة الرياضية التي تجمع جهد البوابة بتيار المصرف تسمى معادلة شوكلي (Shockley's equation) وتعطى بالصيغة:

$$I_D = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \qquad (8-1)$$

حيث ان I_{DSS} و V_P هي ثوابت لترانزستور معين.

$$I_D = 8.4 \quad \left(1-\frac{-1}{-3}\right)^2$$

$I_D=8.4\ X(1-0.33333)^2$

$I_D=3.73$ mA