١.٩ ترانزستور تأثير المجال (Field-Effect Transistor)

بالرغم من ان فكرة ترانزستور تأثير المجال (FET) كانت معروفة منذ ان عرف ترانزستور ثنائي القطبية الوصلي (JBT) إلا ان عملية تصنيعه لم تتم بنجاح قبل سنة ١٩٦٠. في الوقت الراهن يعتبر ترانزستور تأثير المجال العنصر الأساسي المكون للدوائر المتكاملة.

يمتاز ترانزستور تأثير المجال عن ترانزستور ثنائي القطبية الوصلي (BJT) في عدة جوانب أهمها:

١. سهولة تصنيعه وكذلك صغر المساحة التي يشغلها لذلك فانه اكثر استعمالاً وملائمة في الدوائر المتكاملة، وكذلك تكون أطول عمراً واكبر كفاءة.
٢. يمتلك ممانعة إدخال عالية جداً (عادة ما تكون اكبر من $100\text{M}\Omega$).
٣. يكون أقل عرضة للتأثيرات الحرارية.
٤. يكون أقل توليداً للضوضاء.
٥. يمكن استعماله عند الترددات العالية وذلك لان حركة الحاملات في القناة لا تتم عن طريق الانتشار بل في مجال معجل.

ان اساس 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:

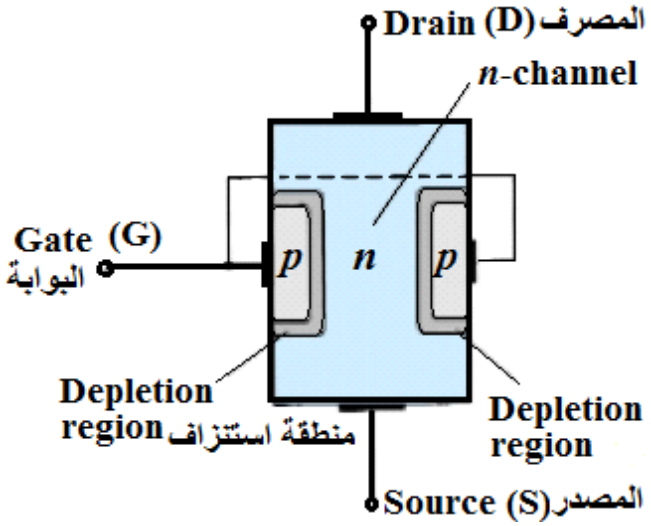
١- ترانزستور تأثير المجال الوصلي Junction Field-Effect Transistor (JFET)
٢- ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني Metal-Oxide-Semiconductor FET (MOSFET)

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

٢.٩ ترانزستور تأثير المجال الوصلي (JFET)

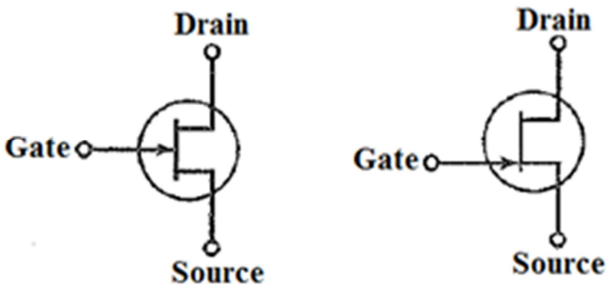
هناك نوعان من ترانزستور تأثير المجال الوصلي وهما ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة (*n*-channel JFET) وترانزستور تأثير المجال ذي القناة الموجبة (*p*-channel JFET) وذلك تبعاً لتركيب وخصائص كل نوع.

الشكل (٩-١) 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 ٩-١: 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 التالي يوضح رمز ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة المتماثلة وغير المتماثلة.

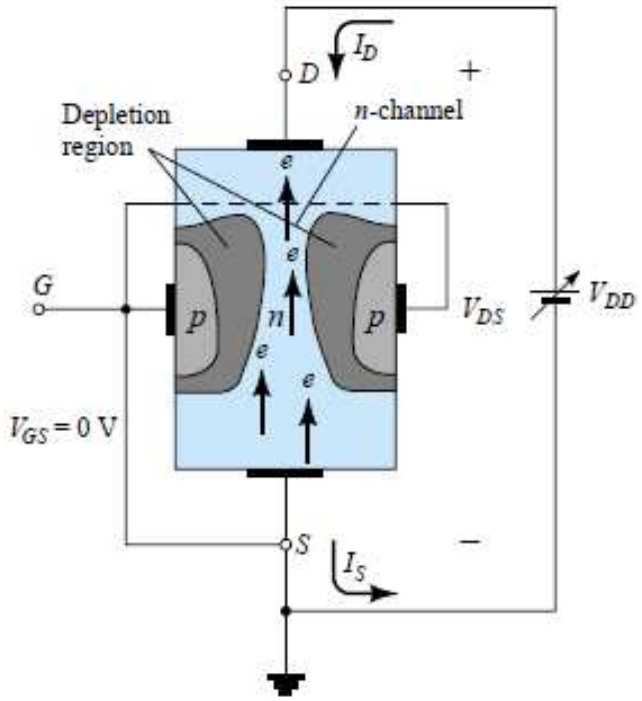


شكل ٩-٢: رمز ترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة المتماثلة وغير المتماثلة

٣.٩ 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 وندرس التأثير الذي يسببه تسليط جهد موجب صغير على المصرف كما هو موضح بالشكل (٩-٣).

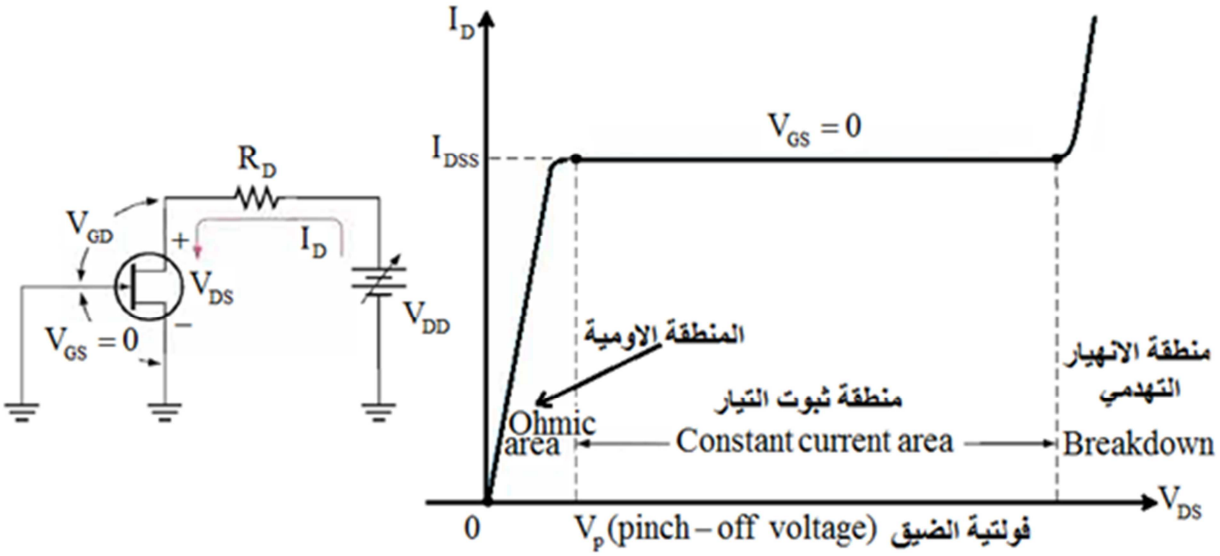
ان الجهد الموجب المسلط بين المصرف D و المنبعS يؤدي إلى سريان الإلكترونات من المنبع إلى المصرف وقيمة التيار المار يعتمد في البداية على قيمة الجهد المسلط وكذلك على قيمة مقاومة القناة (قانون أوم). حيث يزداد تيار القناة بزيادة الجهد المسلط V_{DS}.



شكل ٩-٣: 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.

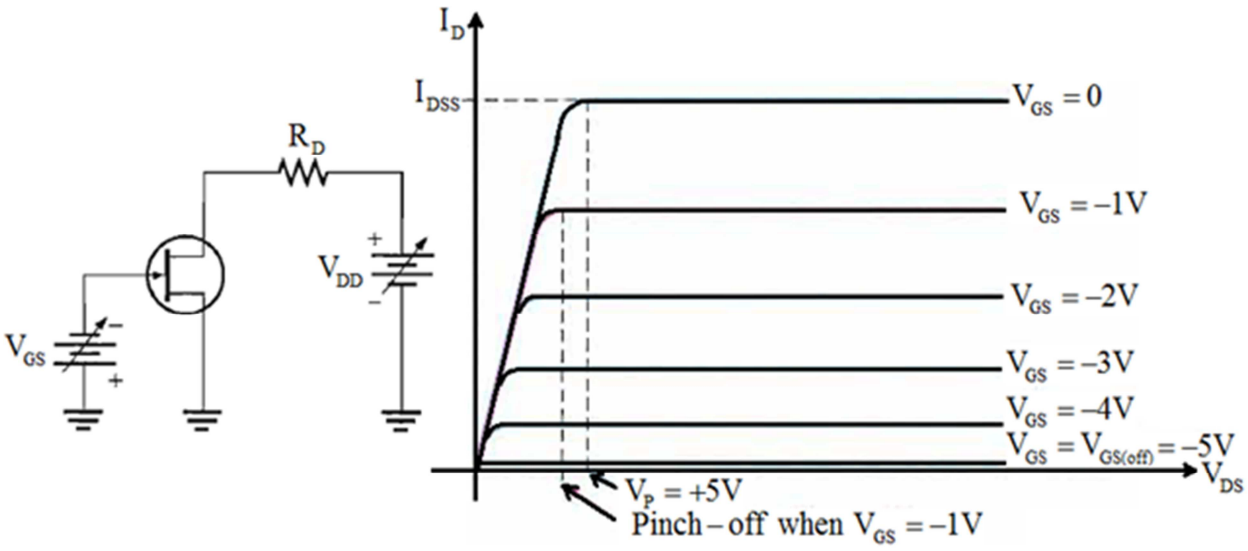
الشكل (٩-٤) يوضح منحنى تغير تيار المصرف مع فولتية المصرف في حالة تأريض البوابة.



الشكل ٩–٤: منحنى تغير تيار المصرف مع فولتية المصرف في حالة تأريض البوابة

يلاحظ من الشكل (٩–٤) 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). 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، حيث تقابل منطقة ثبوت التيار لترانزستور تأثير المجال الوصلي المنطقة الفعالة لترانزستور ثنائي القطبية الوصلي (BJT).

في حالة تسليط فولتية سالبة على البوابة فان ذلك سيؤدي إلى زيادة الجهد العكسي المسلط لوصلتي البوابة–المصرف و البوابة–المصدر، وبالنتيجة يقل التيار المار في القناة مقارنة بالتيار المار في حالة تأريض البوابة. الشكل (٩–٥) يوضح منحنيات الإخراج لترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي البوابة السالبة بالإضافة للدائرة التي تستعمل في دراسة خواص الإخراج.



شكل ٩–٥: منحنيات الإخراج لترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي البوابة السالبة

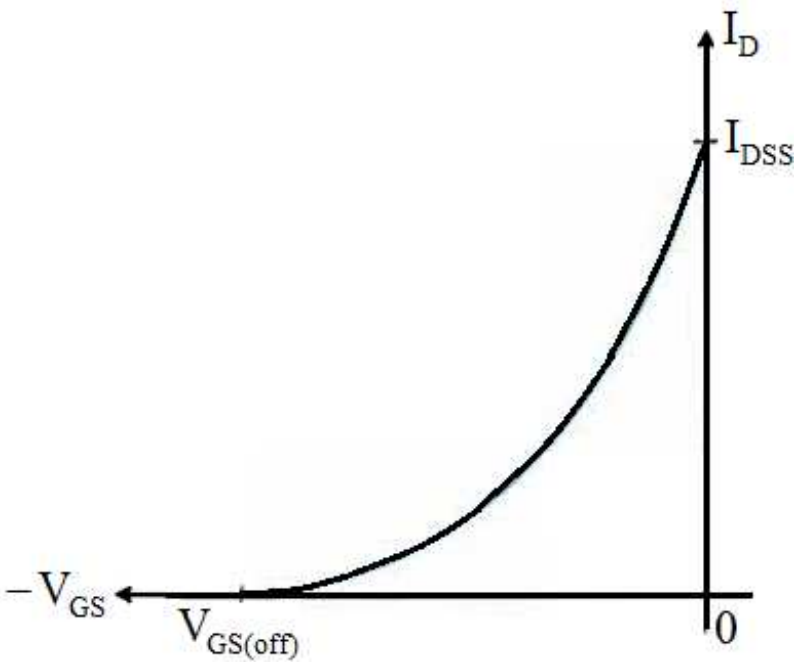
نلاحظ من منحنيات الإخراج ان فولتية البوابة السالبة تسيطر على تيار المصرف حيث يقل تيار المصرف عن قيمته العظمى التي كانت عند (V_{GS}=0) كلما زادت سالبية جهد البوابة.

٤.٩ الخصائص الانتقالية لترانزستور تأثير المجال الوصلي (JFET)

لاحظنا من منحنيات الإخراج ان جهد البوابة هو الذي يسيطر على تيار المصرف وبالتالي فان العلاقة التي تربط بينهما مهمة جداً، الشكل (٩–٦) 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:

$$I_D = I_{DSS}(1-\frac{V_{GS}}{V_P})^2 \qquad (9-1)$$

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



شكل ٩–٦: منحنى الخواص الانتقالية لترانزستور تأثير المجال الوصلي

٥.٩ دوائر تحييز ترانزستور تأثير المجال الوصلي (JFET) وتحديد نقطة العمل

كما هو الحال في ترانزستور ثنائي القطبية الوصلي، ينبغي توفير ظروف العمل الملائمة لعمل ترانزستور تأثير المجال الوصلي ويتم ذلك من خلال دوائر التحييز التي تعمل على جعل ترانزستور تأثير المجال عاملاً في منطقة ثبوت تيار المصرف.

عند التعامل مع دوائر تحييز ترانزستور تأثير المجال يمكن اعتبار تيار البوابة مساوياً للصفر دائماً (لكون البوابة منحازة عكسياً دائماً) أي ان (I_G=0)، وكذلك يمكن استعمال علاقة شوكلي في جميع الحالات. هناك عدة دوائر تحييز وسنتناول ابرز دائرتين وهي:

أولاً: دائرة الانحياز الثابت Fixed–Bias

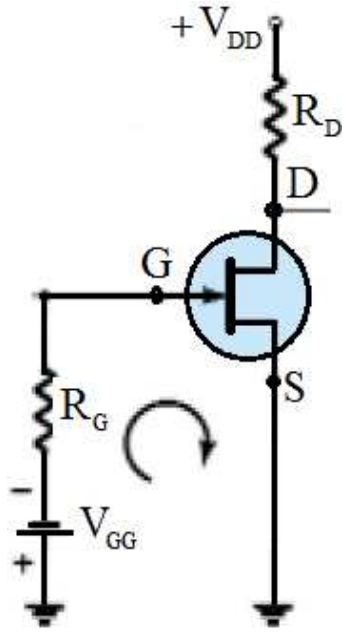
الشكل (٩–٧) يوضح دائرة الانحياز الثابت لترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة.

بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على دائرة الإدخال (دائرة البوابة) نحصل على:

$$-V_{GG} - I_G R_G - V_{GSQ} = 0 \ , \quad \text{But we have } I_G = 0$$

$$V_{GSQ} = -V_{GG} \qquad (9-2)$$

وحيث ان V_{GG} ثابتة القيمة تكون V_{GSQ} ثابتة القيمة.



شكل ٩–٧: دائرة الانحياز الثابت لترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة

بعد إيجاد V_{GSQ} يمكننا إيجاد تيار المصرف في ظروف العمل الساكنة باستعمال علاقة شوكلي.

حيث تكون قيم I_{DSS} و V_P معلومة للترانزستور المعني.

وبعد إيجاد تيار المصرف I_{DQ} يمكننا إيجاد فولتية الإخراج (V_{DS}) وذلك بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على دائرة الإخراج ومنه نحصل على:

$$V_{DD} - I_{DQ}R_D - V_{DSQ} = 0$$

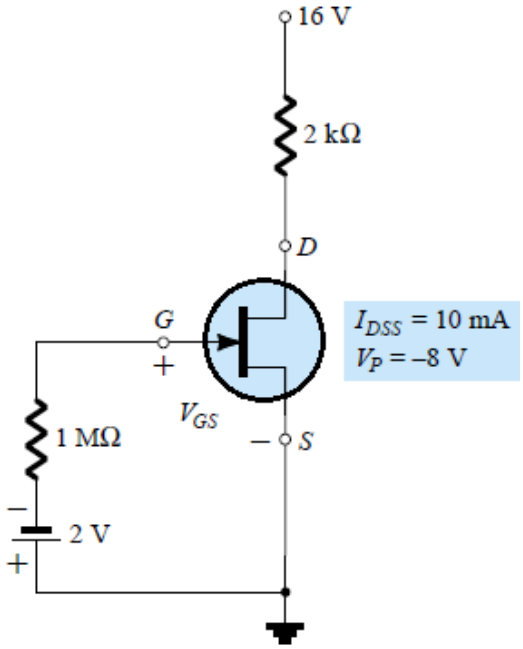
$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}R_D \qquad (9-3)$$

وبتحديد احداثي النقطة (V_{DSQ} , I_{DQ}) يمكننا تحديد موضع نقطة العمل على منحنى خواص الإخراج، وكذلك يمكننا تحديد موضع نقطة العمل الساكنة على منحنى الخواص الانتقالية من خلال تحديد موضع النقطة (V_{GSQ} , I_{DQ}).

مثال (٩-١):

في الشكل المجاور أوجد قيم كل من:

V_{DSQ} , I_{DQ} , V_{GSQ}



الحل:

نلاحظ ان دائرة التحييز هي دائرة الانحياز الثابت وفيها يكون:

$$V_{GSQ} = -V_{GG} \quad \Rightarrow \quad V_{GSQ} = -2V$$

$$I_{DQ} = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P})^2$$

$$I_{DQ} = 10\times10^{-3}(1 - \frac{-2}{-8})^2 = 10\times10^{-3}(1+0.25)^2$$

$$I_{DQ} = 5.625\times10^{-3}\,A \quad \Rightarrow \quad I_{DQ} = 5.625mA$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}R_D$$

$$V_{DSQ} = 16 - (5.625\times10^{-3})\times(2\times10^{3}) \quad \Rightarrow \quad V_{DSQ} = 4.75V$$

ثانياً: دائرة انحياز مقسم الجهد Voltage-Divider Bias

الشكل (٩-٨) يوضح دائرة انحياز مقسم الجهد، والتي تشبه دائرة مقسم الجهد التي تم استعمالها في ترانزستور ثنائي القطبية الوصلي.

من الشكل نجد:

$$I_S = I_D \quad , \quad I_G \cong 0$$

$$V_S = I_S R_S \quad \Rightarrow \quad V_S = I_D R_S$$

جهد البوابة V_G يمكن إيجاده باستعمال قانون مجزئ الجهد:

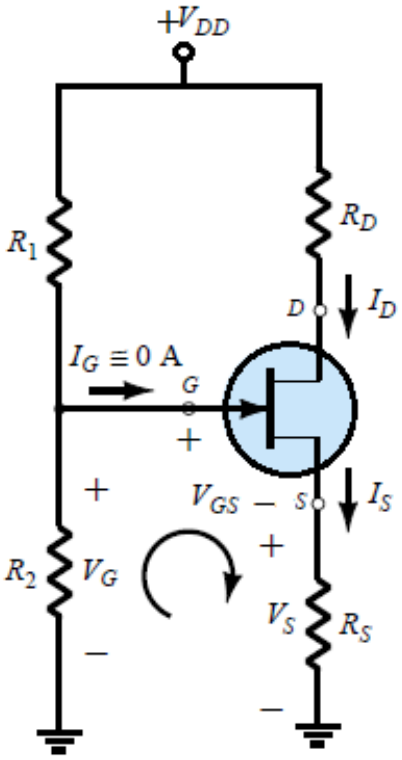
$$V_G = (\frac{V_{DD}}{R_1 + R_2})R_2$$

بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على دائرة الإدخال:

$$V_G - V_{GS} - V_S = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{GS} = V_G - V_S$$

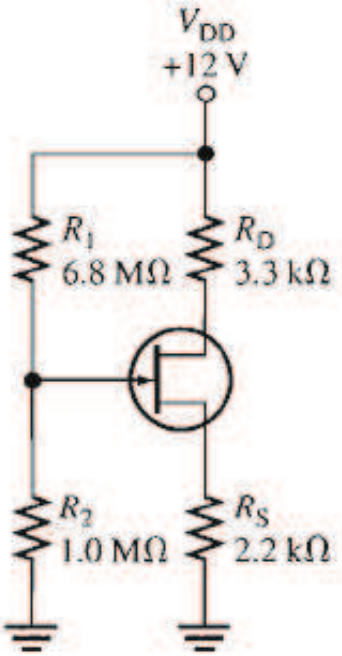
تيار المصرف I_D يمكن التعبير عنه بالصيغة:

$$I_D = \frac{V_S}{R_S} = \frac{V_G - V_{GS}}{R_S} \qquad (9-4)$$



شكل ٩–٨: دائرة انحياز مقسم الجهد لترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي القناة السالبة

مثال (٩–٢): أوجد I_D و V_{GS} لـ JFET لدائرة مقسم الجهد الموضحة بالشكل علماً بان ($V_D \approx 7V$).



الحل:

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R_D} = \frac{12-7}{3.3\times10^3}$$

$$I_D = 1.52\times10^{-3}\,A$$

لإيجاد V_{GS} نستعمل العلاقة:

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

ولإيجاد V_G نستعمل العلاقة:

$$V_G = (\frac{V_{DD}}{R_1 + R_2})R_2$$
$$V_G = (\frac{12}{6.8\times10^6 + 1\times10^6})\times1\times10^6 = (\frac{12}{7.8\times10^6})\times10^6$$
$$V_G = 1.54V$$

وكذلك لدينا:

$$V_S = I_D R_S$$
$$V_S = (1.52\times10^{-3})\times(2.2\times10^3)$$
$$V_S = 3.34V$$

بالتعويض عن قيم V_G و V_S يمكننا إيجاد V_{GS} :

$$V_{GS} = V_G - V_S$$
$$V_{GS} = 1.54 - 3.34$$
$$V_{GS} = -1.8V$$

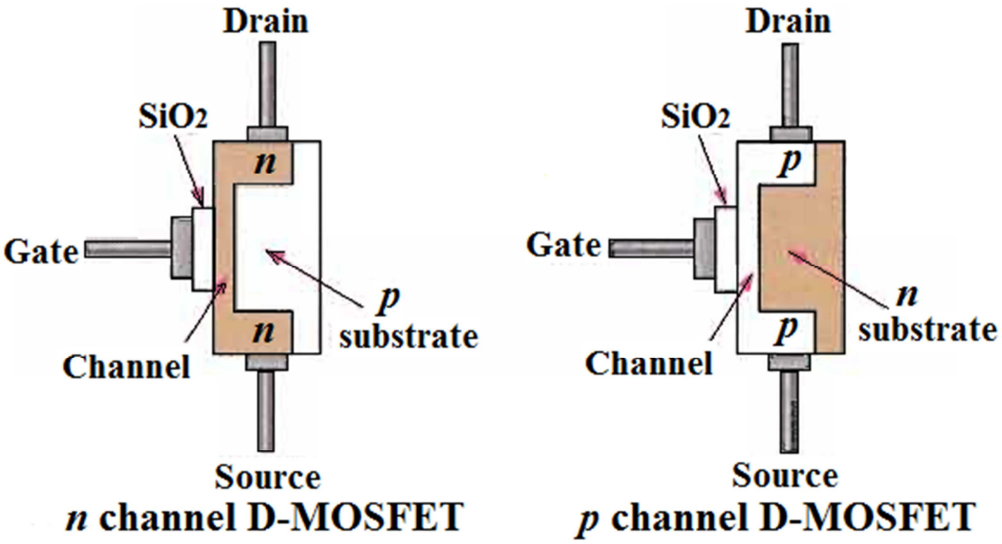
٦.٩ ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني MOSFET

Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (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). هناك نوعان من ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني هما:

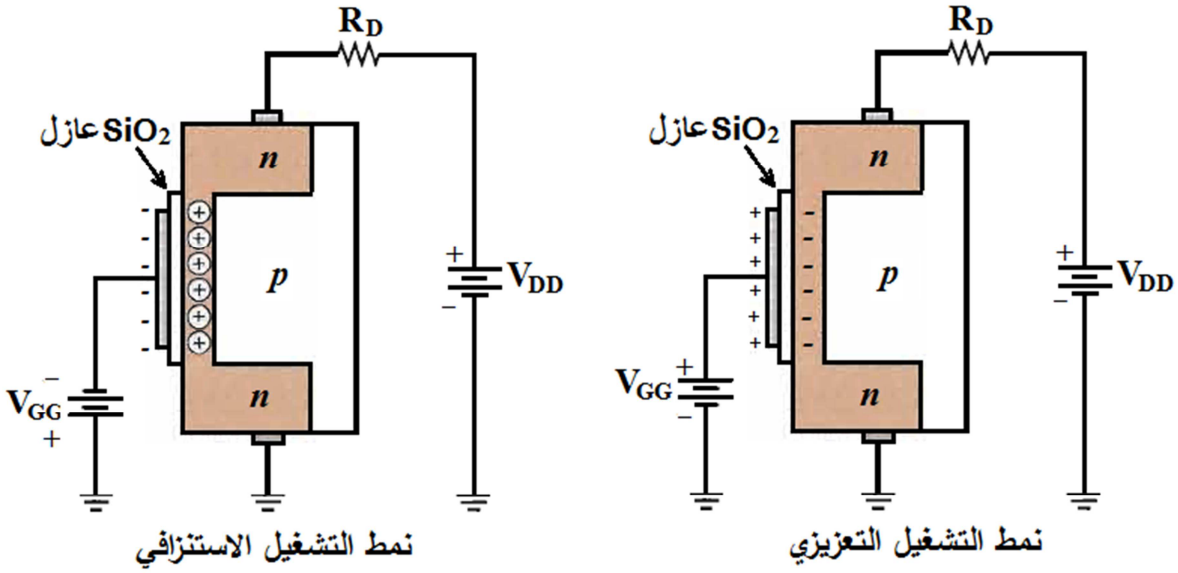
أولاً: ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني الاستنزافي D-MOSFET

الشكل (٩-٩) يوضح تركيب D-MOSFET ذي القناة السالبة و تركيب D-MOSFET ذي القناة الموجبة. سوف نركز في دراستنا على ترانزستور D-MOSFET ذي القناة السالبة (قناة *p* تعامل بنفس الأسلوب ولكن بقطبيات معاكسة).



شكل ٩-٩: تركيب D-MOSFET ذي القناة السالبة و تركيب D-MOSFET ذي القناة الموجبة

لترانزستور D-MOSFET ذي القناة السالبة نمطين للعمل يسمى الأول نمط العمل الاستنزافي (depletion mode) وفيه تسلط فولتية سالبة على البوابة، اما الثاني فيسمى النمط التعزيزي (enhancement mode) وفيه يتم تسليط فولتية موجبة على البوابة، وغالباً يستعمل D-MOSFET للعمل ضمن النمط الاستنزافي، الشكل (٩-١٠) يوضح نمطي التشغيل لـ D-MOSFET ذي القناة السالبة.



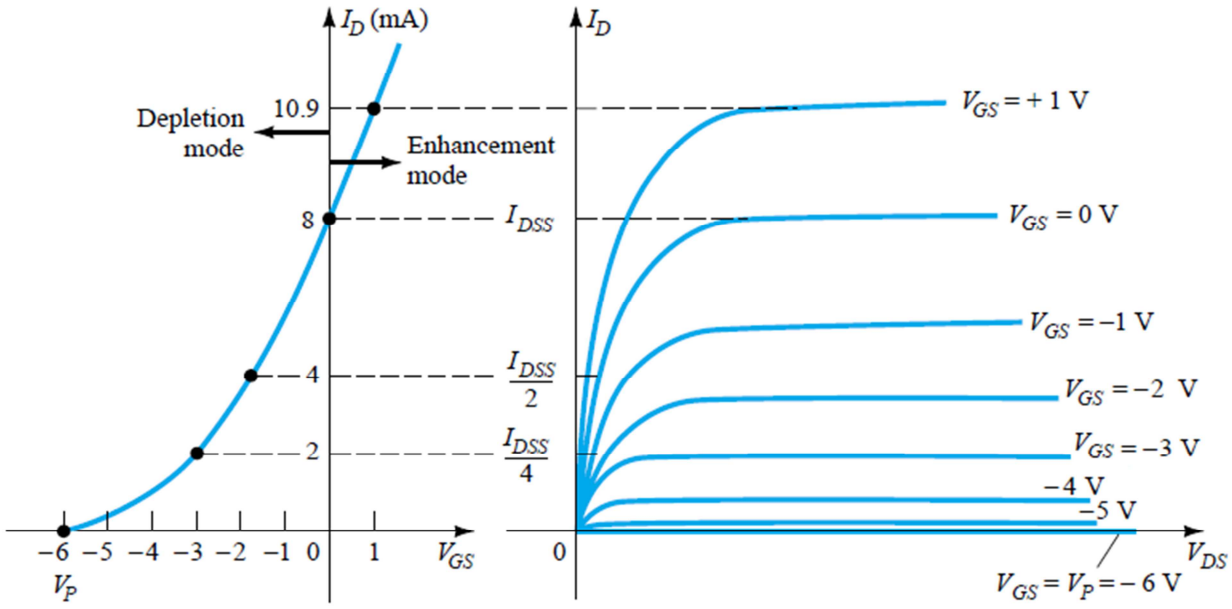
شكل ٩-١٠: نمطي التشغيل لـ D-MOSFET ذي القناة السالبة

لفهم مبدأ العمل يمكن تصور جهتي القناة والبوابة المحيطة بطبقة العازل كلوحي متسعة بينهما عازل SiO_2، وفيما يلي شرح لفكرة عمل كل نمط تشغيل:

أ- في حالة نمط التشغيل الاستنزافي تتجمع شحنات سالبة على البوابة والتي بدورها تعمل على دفع الكترونات التوصيل من الجهة المقابلة من القناة تاركة في محلها أيونات موجبة وبالنتيجة تستنزف بعض الكترونات القناة وبالتالي تقل توصيلية القناة، وبزيادة الجهد السالب تزداد عملية استنزاف الكترونات القناة مما يؤدي إلى التقليل من تيار المصرف إلى ان يصل الجهد السالب إلى قيمة بحيث يوقف سريان تيار المصرف كلياً ($V_{GS(off)}$).

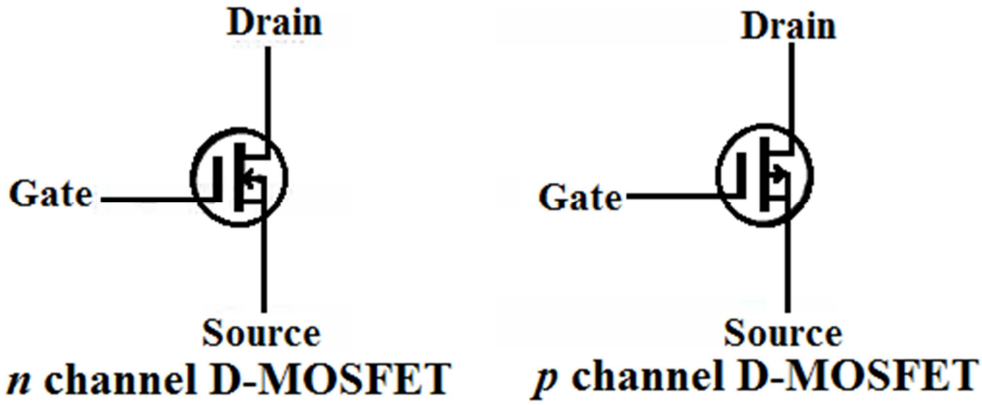
ب- في حالة التشغيل بالنمط التعزيزي تسلط فولتية موجبة على البوابة فتتجمع الشحنات الموجبة عليها والتي تعمل على جذب المزيد من الكترونات التوصيل إلى القناة مما يزيد من توصيليتها فيزداد تيار المصرف بزيادة الجهد المسلط على البوابة.

الشكل (٩-١١) التالي يوضح منحنيات خواص الإخراج ومنحنى الخواص الانتقالية لترانزستور D-MOSFET ذي قناة سالبة في حالة نمطي التشغيل الاستنزافي والتعزيزي:



شكل ٩-١١: منحنيات خواص الإخراج ومنحنى الخواص الانتقالية لترانزستور D-MOSFET ذي قناة سالبة في حالة نمطي التشغيل الاستنزافي والتعزيزي

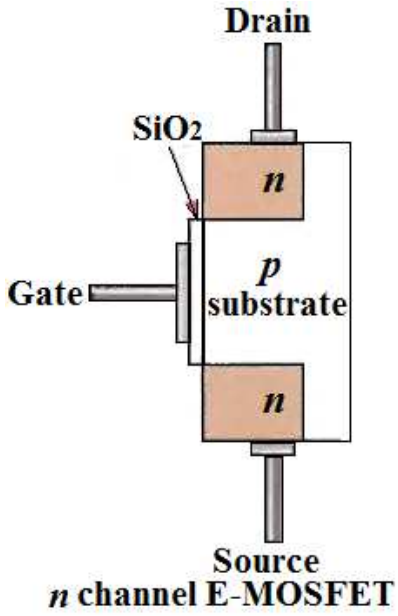
الشكل (٩-١٢) يوضح رمزي D-MOSFET ذي القناة السالبة والقناة الموجبة حيث يلاحظ الاختلاف مع رمز JFET بكون البوابة معزولة عن القناة وليست متصلة معها .



شكل ٩-١٢: رمزي D-MOSFET ذي القناة السالبة والقناة الموجبة

ثانياً: ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني التعزيزي E-MOSFET (Enhancement MOSFET)

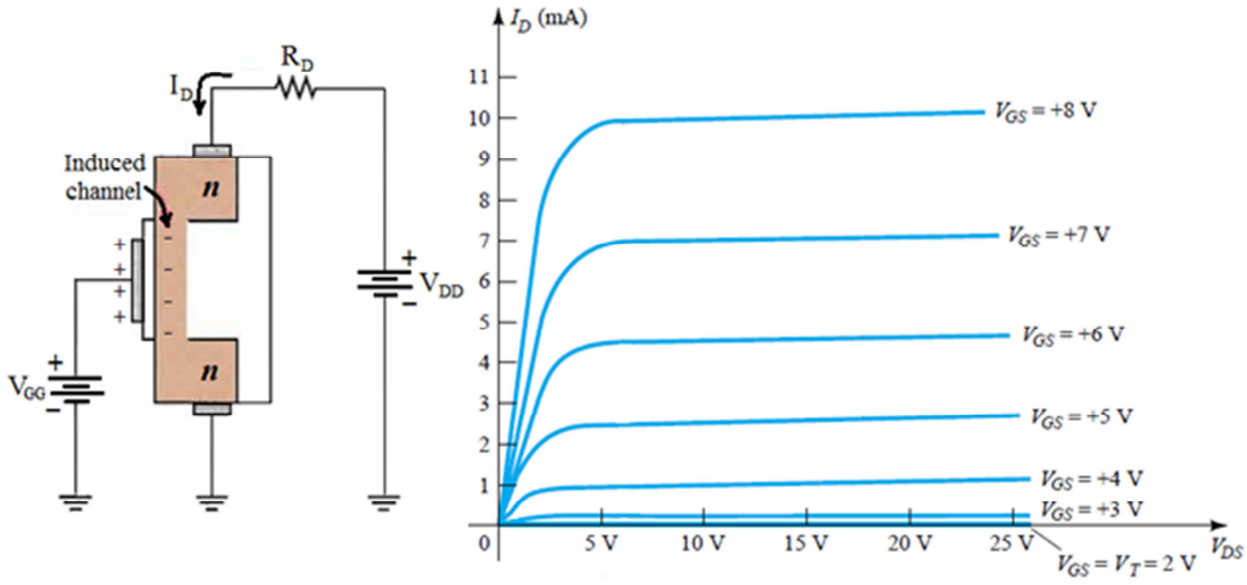
يعمل (E-MOSFET) ضمن النمط التعزيزي فقط، ويختلف عن D-MOSFET بكون تركيبه لا يتضمن قناة، حيث تمتد منطقة الأساس لتصل إلى طبقة العازل SiO_2. الشكل (٩-١٣) يوضح تركيب ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني التعزيزي ذي القناة السالبة، حيث يلاحظ عدم وجود قناة (في التركيب عند صناعته) وان منطقة الأساس متصلة بطبقة العازل.



شكل ٩-١٣: تركيب ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني التعزيزي ذي القناة السالبة

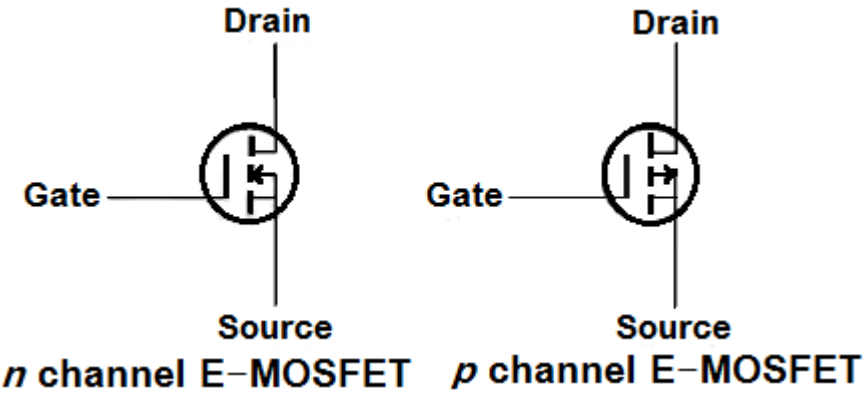
ان فكرة عمل E–MOSFET ذي القناة السالبة فتكون كالتالي:

عند تسليط جهد موجب على البوابة اعلى من قيمة حدية معينة (V_T) يؤدي إلى توليد قناة مؤلفة من طبقة رقيقة من الكترونات في منطقة الأساس المجاورة لطبقة العازل، وبزيادة الجهد المسلط عن القيمة الحدية تزداد توصيلية القناة "المستحثة" وبالتالي يزداد تيار المصرف بزيادة الجهد المسلط. الشكل (٩–١٤) يوضح منحنيات خواص الإخراج لترانزستور E–MOSFET ذي القناة السالبة والدائرة المستعملة.



شكل ٩–١٤: منحنيات خواص الإخراج لترانزستور E–MOSFET ذي القناة السالبة

الشكل (٩–١٥) يوضح رمزي E–MOSFET ذي القناة السالبة و ذي القناة الموجبة، الخط المقطع للدلالة على عدم وجود القناة في التركيب.



شكل ٩–١٥: رمزي E–MOSFET ذي القناة السالبة و ذي القناة الموجبة

أسئلة الفصل التاسع

س١: قارن بين كل من:

أ- ترانزستور ثنائي القطبية الوصلي (BJT) وترانزستور تأثير المجال (FET).

ب- ترانزستور تأثير المجال الوصلي (JFET) وترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني (MOSFET).

ت- ترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني الاستنزافي (D-MOSFET) وترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني التعزيزي (E-MOSFET).

س٢: ارسم مع التأشير:

أ- منحنيات الإخراج لترانزستور تأثير المجال الوصلي ذي البوابة السالبة.

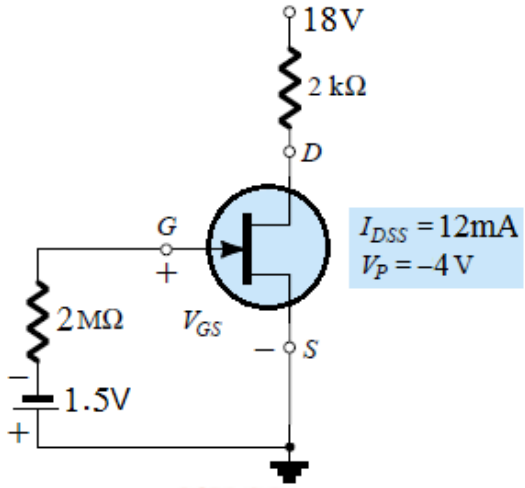
ب- منحنيات خواص الإخراج لترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني الاستنزافي ذي القناة السالبة.

ت- منحنيات خواص الإخراج لترانزستور تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني التعزيزي ذي القناة السالبة.

س٣:

في الشكل المجاور، أوجد قيم كل من:

V_{DSQ} , I_{DQ} , V_{GSQ}



س٤:

أوجد I_D و V_{GS} لـ JFET لدائرة مقسم الجهد الموضحة بالشكل علماً بان ($V_D \approx 5V$).