كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : الكترونيات٢

المحاضرة :السادسة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2025

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

ترانزستور التأثير الحقلي
Filed Effect Transistor

إن أساس عمل ترانزستور الحقلي هو التحكم في قيمة شدة التيار الخارج بواسطة التأثير الذي يحدثه المجال الكهربائي الناتج عن تطبيق جهد على مسار ذلك التيار (أي التحكم بشدة التيار الكهربائي عن طريق الحقل الكهربائي المطبق على التيار المار في مادة نصف الناقل) وتُدعى ظاهرة الحقل الكهربائي العامودي على سطح نصف الناقل واتجاه التيار بالتأثير الحقليeffect field ، ومن هنا جاءت تسمية الترانزستور بالترانزستور التأثير الحقليFET.

ويسمى أيضا بالترانزستور الأحادي القطبية وذلك لأن التيار الناتج يعتمد على حركة نوع واحد من حاملات الشحنة (أما الالكترونات الحرة أو الثقوب) وذلك حسب نوع القناة (channel) المستعملة.

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

سهولة تصنيعه وكذاك صغر المساحة التي يحتلها مما يجعله من أهم المكونات في تصنيع الدارات المتكاملة (IC)، وكذلك أكثر كفاءة وأطول عمر من الترنزستورات ثنائية القطبية.

يمتلك مقاومة دخل عالية واستهلاك منخفض للطاقة، كما ويتميز بالاستقرار الحراري وأنه أقل تأثيراً بالضوضاء والتشويش مقارنة مع BJT.

يتكون الترانزستور الحقلي من نوعين:

ترانزستور الحقلي ذو الوصلة JFET(Junction Filed Effect Transistor).

الترانزستور الحقلي ذو البوابة المعزولة أو يسمى الترانزستور الحقلي ذو الأكسيد المعدن نصف الناقل MOSFET (The Metal–Oxide–Semiconductor Field Effect Transistor)

البنية الداخلية للترانزستور الحقلي وآلية عمله:

الترانزستور الحقلي ذو الوصلة:

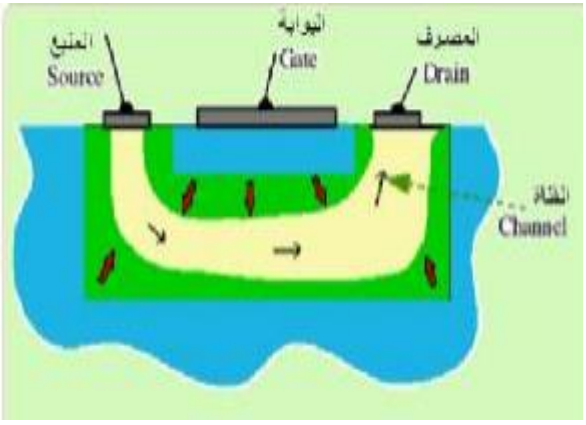
عبارة عن قطعة نصف ناقلة من النوع N أو من النوع P تسمى بالقناة Channel موصولة من طرفيها بتماس أومي وتولد عليها طبقتان رقيقتان من النوع P (أو النوع N) حسب نوع القناة حيث توصل هاتان الطبقتان مع بعضهما البعض ويتألف الترانزستور في حالة القناة من النوع N (تتم الدراسة علة ترانزستور حقلي ذو قناة N) من المساري الثلاث التالية:

المنبع (Source): وهو النهاية التي تدخل منها حاملات الشحنة الأكثرية إلى القطعة N.

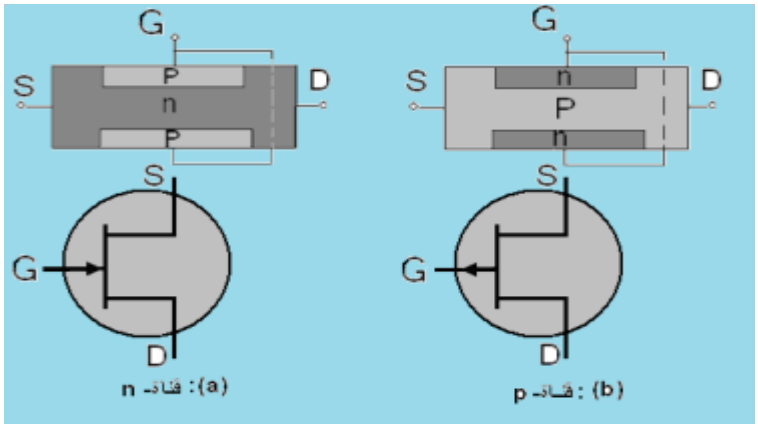
المصرف (Drain): وهو النهاية التي تترك منها حاملات الشحنة القطعة N ويمر تيار في القطعة N شدته I_D عندما نطبق فرقاً في الجهد V_{DS} موجباً.

البوابة (Gate): وتسمى أيضاً الشبكة لأن عملها يشبه عمل الشبكة في الصمام الالكتروني ثلاثي المساري إذا إنها تتحكم بكمونها في شدة التيار المار في نصف الناقل وتتألف من طبقتين مشوبتين بشكل كبير من شوائب P ونحصل هكذا على متصلين من النوع PN يطبق فرق في الكمون بين البوابة والمنبع بحيث يكون المتصل الثنائي في حالة تغذية عكسية أما القناة Channel فهي عبارة عن المنطقة من نصف الناقل N الكائنة بين منطقتي البوابة حيث تمر عبرها حاملات الشحنة الأكثرية من المنبع إلى المصرف، عندما تكون حاملات الشحنة الأكثرية هي الالكترونات تكون القناة من النوع N ويسمى الترانزستور بالترانزستور الحقلي ذو القناة N، أما عندما تكون حاملات الشحنة الأكثرية هي الثقوب تكون القناة من النوع P ويسمى الترانزستور بالترانزستور الحقلي ذو القناة P، ويشير السهم إلى اتجاه التيار الذي يسري في البوابة عند الانحياز الأمامي.

يبين الشكل (1) مكونات الترانزستور الحقلي، ويبين الشكل (2) الرمز الالكتروني للترانزستور في الدارات الكهربائية.



الشكل (1): مكونات الترانزستور الحقلي



الشكل (2): الرمز الالكتروني للترانزستور في الدارات الكهربائية

مبدأ عمله والمميزات الساكنة:

نطبق فرقاً في الكمون V_{DS} موجباً بين المصرف والمنبع بحيث يكون المصرف موجباً بالنسبة للمنبع فيمر تيار في نصف الناقل من النوع N أي القناة أما شدة هذا التيار فتابعة لـV_{DS} وفرق الكمون V_{GS} المطبق بين البوابة والمنبع أي أن:

$$I_D = f(V_{DS}, V_{GS})$$

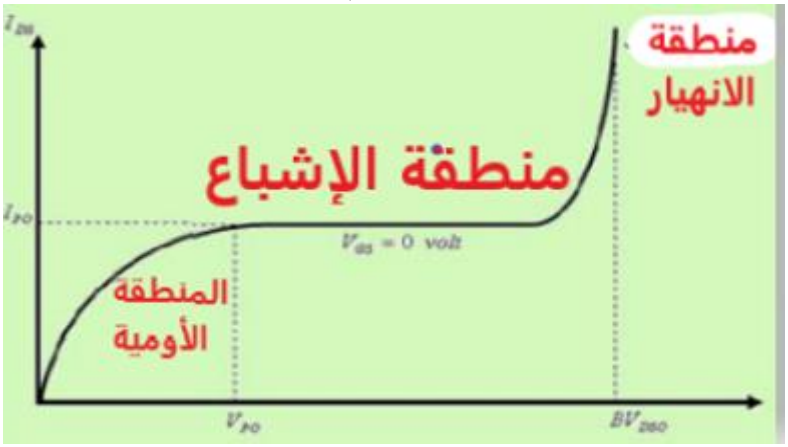
حيث نطبق بين البوابة والمنبع فرقاً في الكمون سالباً بحيث تكون البوابة سالبة بالنسبة للمنبع وعند وصل المنبع والشبكة بالأرضي $V_{GS} = 0$ ونطبق V_{DS} موجب فيمر تيار في القناة نتيجة لحركة الالكترونات لكن القناة N تشكل مع البوابة متصلاً ثنائياً فتظهر شحنات موجبة من جهة N وشحنات سالبة من جهة P على سطح التماس في المتصل الثنائي وتتشكل منطقة الاستنزاف في جزء من القناة وبما أن الكمون يزداد كلما اتجهنا من المنبع إلى المصرف لذلك يزداد عرض منطقة الاستنزاف كلما اقتربنا من المصرف وبالتالي يضيق عرض القسم نصف الناقل كلما اقتربنا من المصرف.

إذا فرضنا أن V_{DS} منخفض نسبياً يزداد التيار I_D مع V_{DS} بشكل خطي تقريباً لأن عرض المنطقة الناقلة من القناة لازال عريضاً وتتحرك الالكترونات كما لو كانت في نصف ناقل عادي وتسمى المنطقة الأومية.

عندما يزداد V_{DS} يجب أن تزداد شدة التيار I_D مع زيادة فرق الكمون المطبق من جهة وتؤدي زيادة V_{DS} إلى زيادة الاختناق في القناة في المنطقة القريبة من المصرف أي تخفيض شدة التيار من جهة ثانية نتيجة لتأثير هذين العاملين في اتجاهين متعاكسين يبقى التيار I_D ثابتاً تقريباً وهذه المنطقة الخطية هي المستخدمة في التضخيم وفي توليد الإشارات الجيبية وتسمى منطقة الإشباع.

إذا تابعنا زيادة V_{DS} إلى أكبر من قيمة حدية نحصل على انهيار المتصل الثنائي أي نحصل على ظاهرة زينر وبالتالي يزداد I_D بشكل مفاجئ وهذه المنطقة غير مفيدة في عمل الترانزستور وتسمى منطقة الانهيار.

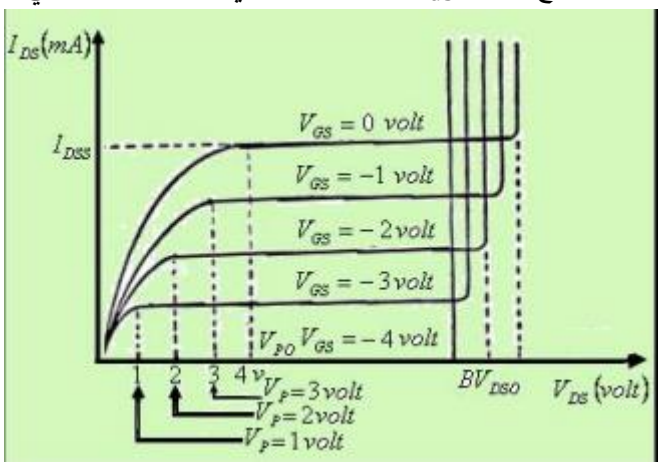
يبين الشكل (3) تغيرات I_D بدلالة V_{DS} ومناطق عمل الترانزستور الحقلي.



الشكل (3): مناطق عمل الترانزستور

لنطبق الآن فرقاً في الكمون سالباً على البوابة $V_{GS} < 0$ يزداد عرض المنطقة المجردة من الشحنات وذلك بسبب زيادة فرق الكمون المطبق على المتصل الثنائي في التغذية العكسية. وبالتالي يزداد اختناق القناة نصف الناقلة تنخفض بالتالي شدة التيار I_D كلما زادت V_{GS} بالقيمة المطلقة أي كلما أصبحت أكثر سلبية.

يمثل المنحني المميز $I_D = f(V_{DS})$ من أجل $V_{GS} = const$ مميزة الخرج الساكنة للترانزستور الحقلي من أجل عدة قيم ل V_{GS} الموضحة بالشكل (4) حيث نلاحظ بدايةً زيادة I_D ثم يبقى ثابتاً وعندما تصل V_{DS} إلى قيمة حدية جديدة تظهر حادثة الانهيار من جديد من أجل قيمة ل V_{DS} أخفض من القيمة السابقة لأن فرق الكمون بين طرفي المتصل الثنائي عبارة عن $V_{DS} - V_{GS}$ بزيادة V_{GS} بالقيمة المطلقة نصل إلى قيمة ينعدم فيها التيار I_D نسمي هذا الكمون كمون التوقف أو القطع ويرمز له V_p ويمكننا زيادة شدة تيار المصرف بتطبيق جهد موجب بين البوابة والمنبع $V_{GS} > 0$ إلا أن هذه الطريقة غير مستخدمة في التطبيقات العملية.

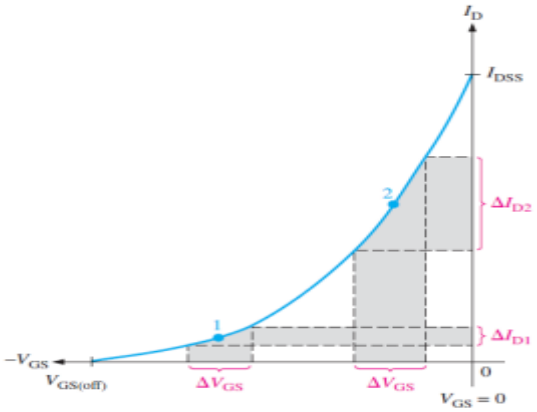


الشكل (4): مميزة الخرج الساكنة للترانزستور الحقلي من أجل عدة قيم ل V_{GS}

نلاحظ من الشكل (5) أننا إذا أخذنا قيمة ثابتة ل V_{DS} واقعة في المنطقة الخطية (منطقة الإشباع) يمكننا رسم مميزة الخرج بسهولة $I_D = f(V_{GS})$ فنحصل على منحني له شكل قطع مكافئ الموضح في الشكل (6) وتعطى شدة التيار نظرياً بالعلاقة (1-1):

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

تمثل I_{DO} شدة تيار المصرف من أجل $V_{GS} = 0$، و V_P كمون البوابة اللازم لإيقاف الترانزستور.



الشكل (5): المنحني $I_D = f(V_{GS})$

تعرف المقاومة الداخلية للترانزستور بالعلاقة:

$$r_d = (\frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D})_{V_{GS}} = (\frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D})_{V_{GS}}$$

الناقلية التبادلية:

$$g_m = (\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}})_{V_{DS}} = (\frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}})_{V_{DS}}$$

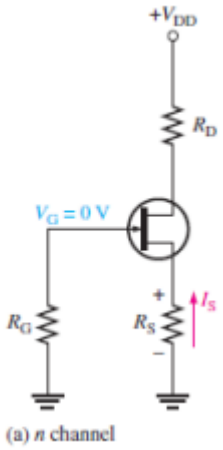
عامل التضخيم

$$\mu = -(\frac{V_{DS}}{V_{GS}})_{I_D}$$

الانحياز الذاتي للترانزستور JFET:

يعد هذا النوع من الانحياز الأكثر شيوعاً في دارات JFET حيث تكون الوصلة منبع بوابة منحازة عكسياً، كما أن وجود المقاومة R_G يعد مهماً لإجبار جهد البوابة $V_G = 0V$

لتكن دارة الانحياز الذاتي لترانزستور JFET ذو القناة نوع n الموضحة في الشكل المجاور:



بتحليل دارة الداخل للترانزستور JFET ذو القناة نوع n نجد:

أن $V_G = 0V$ و $\boldsymbol{I_D = I_S}$ و $V_S = \boldsymbol{I_S} R_S$

والجهد بين طرفي المنبع بوابة يعطى بالعلاقة:

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - \boldsymbol{I_S} R_S$$

ومنه بعد التعويض $\boldsymbol{I_D = I_S}$

$$V_{GS} = -\boldsymbol{I_S} R_S = -\boldsymbol{I_D} R_S$$

وبتحليل دارة الخرج نجد:

$$V_{DD} - \boldsymbol{I_D} R_D - \boldsymbol{I_D} R_S - V_{DS} = 0$$

ومنه

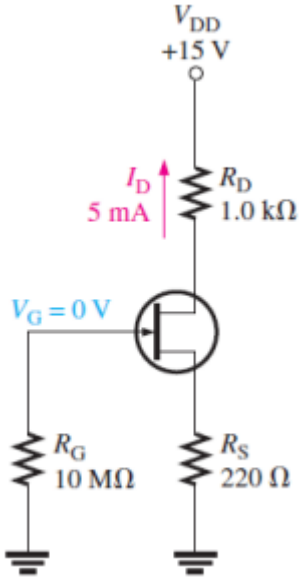
$$V_{DS} = V_{DD} - \boldsymbol{I_D}(R_D + R_S)$$

و

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

تطبيق: لتكن دارة الترانزستور المجاورة ذو القناة n والمطلوب:

أوجد كل من V_{GS} و V_{DS}.



الحل: جهد المنبع يساوي إلى:

$$V_S = \boldsymbol{I_S} R_S = \boldsymbol{I_D} R_S = 5mA(220\Omega)$$
$$V_S = 1.1\text{V}$$

ومنه

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - \boldsymbol{I_D} R_S$$

$$V_{GS} = -V_S = -\boldsymbol{I_D} R_S = -1.1\text{V}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - \boldsymbol{I_D}(R_D + R_S)$$

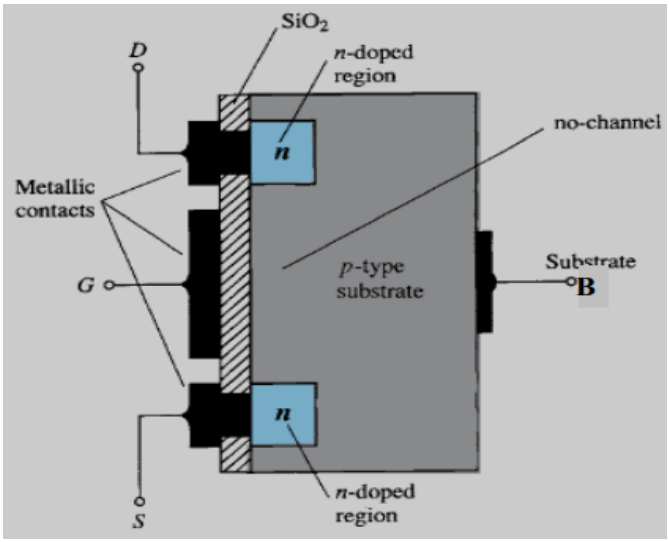
بالتعويض نجد:

$$V_{DS} = 15 - (5mA)(1k\Omega + 220\Omega)$$
$$V_{DS} = 8.9\text{ V}$$

الترانزستور الحقلي ذو البوابة المعزولة MOSFET:

يُعد الترانزستور MOSFET الترانزستور الأشهر والأكثر استخداما وخاصة لتصنيع الدارات المتكاملة عالية الاندماج والذواكر والمعالجات الصغرية .يستخدم الترانزستور الحقلي كجهاز يتم فيه التحكم بالتيار من خلال حقل كهربائي الذي يطبق بشكل متعامد على سطح النصف الناقل ومع اتجاه التيار.

يستخدم في هذا النوع من الترانزستور نصف ناقل من السيليسيوم المشوب من النوع P يدعى النصف الناقل substrate تضف إليه في منطقتين منه شوائب عالية بتركيز كبير فنحصل على منطقتين من النوع N^+ توصل هاتان المنطقتان بقناة نصف ناقلة من النوع N بحيث يكون التركيز فيها متوسطاً تشكل المنطقتان المشوبتان المنبع والمصرف للترانزستور كما موضح في الشكل (6) أما الشبكة أو البوابة فتكون مفصولة عن القناة N بطبقة من أكسيد السليسوم وهو عازل كهربائي وعبارة عن صفيحة ناقلة من الالمنيوم تمتد فوق القناة وتشكل معها مكثفة مستوية العازل فيها ثنائي أوكسيد السليكون.



الشكل (6): مكونات ترانزستور MOSFET

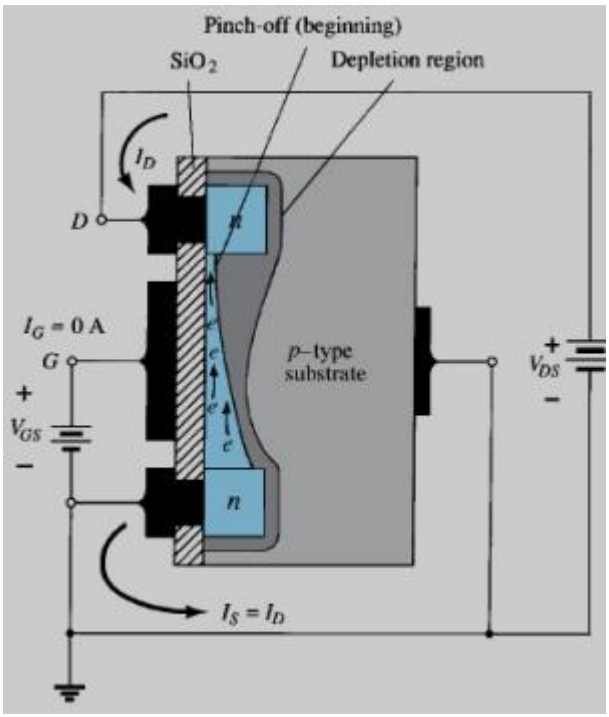
آلية عمل الترانزستور:

يبين الشكل (7) آلية عمل الترانزستور MOSFET ذو مادة الأساس P نطبق بين المصرف والمنبع فرقاً في الكمون موجباً ولنفرض أن البوابة موصولة بالأرضي يمر تيار في القناة N نتيجة لحركة الالكترونات كما في حال JFET ذي القناة N ولا يمر التيار I_D في نصف الناقل الأساسي لأن المتصل المكون من المصرف والمادة الأساسية في حالة تغذية عكسية عندما نطبق $\boldsymbol{V_{DS}}$ يزداد الكمون كلما اتجهنا من S إلى D تتولد بالتالي شحنات موجبة في القناة N من جهة الأوكسيد فتتعدل الشحنات السالبة في قسم من منطقة القناة المجاورة للعازل ونحصل على منطقة لا تحتوي على حاملات للشحنة كما هي الحال في الترانزستور JFET ونحصل على تيار يزداد في البدء مع $\boldsymbol{V_{DS}}$ ثم يبقى ثابتاً تقريباً كما هو موضح في الشكل (8) الممثل للمنحنيات البيانية ل تغيرات $\boldsymbol{I_D = f(V_{DS})}$ من أجل عدة قيم ل $\boldsymbol{V_{GS} = const}$.

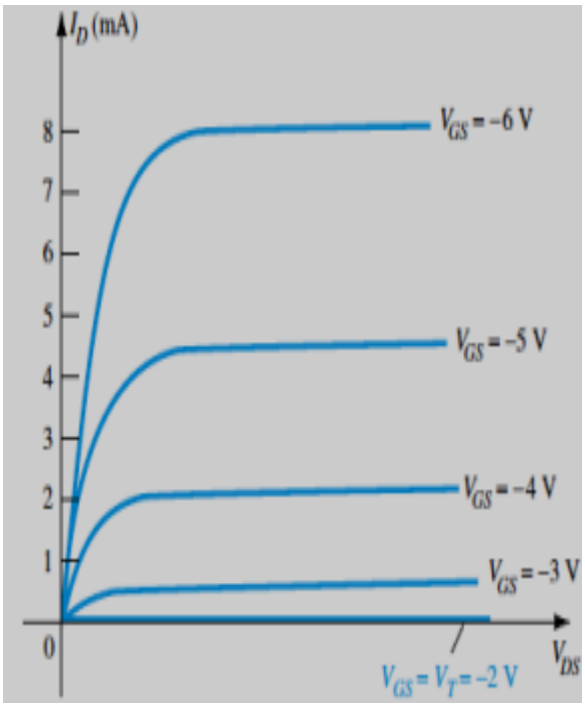
إذا طبقنا على البوابة كموناً $\boldsymbol{V_{GS} < 0}$ نحصل على نظام التجريد تتشحن المكثفة المكونة من البوابة والقناة N بشحنة موجبة من جهة القناة N فتزداد الشحنة الموجبة فيها وهذا يؤدي إلى انخفاض عرض القناة نصف الناقلة N.

أما إذا طبقنا على البوابة كموناً $\boldsymbol{V_{GS} > 0}$ نحصل على نظام الإغناء تزداد الشحنة السالبة في منطقة القناة ويزداد بالتالي عرض المنطقة نصف الناقلة من القناة N وهذا يؤدي إلى زيادة شدة التيار I_D وهذه المميزات مشابهة للترانزستور JFET الذي يمرر تياراً تزداد شدته كلما ازداد V_{GS} بالقيمة الجبرية ونحصل على تغذية أمامية للمتصل الثنائي. أما في الترانزستور MOSFET في حالة تطبيق كمون موجب على الشبكة فلا تمرر الشبكة أي تيار لإنها مفصولة عن القناة بالمادة العازلة.

يمكننا الحصول على MOSFET المكون من مادة أساسية عبارة عن نصف ناقل من النوع P ومادة نصف الناقل المشكلة لكل من المنبع والمصرف من النوع N يعمل الترانزستور في حالة الإغناء أي من أجل $V_{GS} > 0$ ويتولد نتيجة لذلك حقل كهربائي في العازل فتشحن الصفيحة المعدنية للبوابة بشحنة موجبة بينما يشحن المنبع ومادة الأساس Substrate بشحنة سالبة حيث تنجذب الالكترونات الحرة في المادة الأساس وفي المنبع بالبوابة مشكلة قناة تصل بين المنبع والمصرف تسمح بمرور تيار المصرف ويزداد هذا التيار بازدياد الجهد V_{GS} كما موضح في المنحنيات (8).



الشكل (7): آلية عمل الترانزستور



الشكل (8): المنحني البياني ل $I_D = f(V_{DS})$

يستخدم الترانزستور MOSFET في تضخيم الإشارات الصغيرة في منطقة الإشباع من عمله كما ويتميز بمقاومة دخل مرتفعة جداً بحدود $10^3 M\Omega$.

مكتبة A to Z