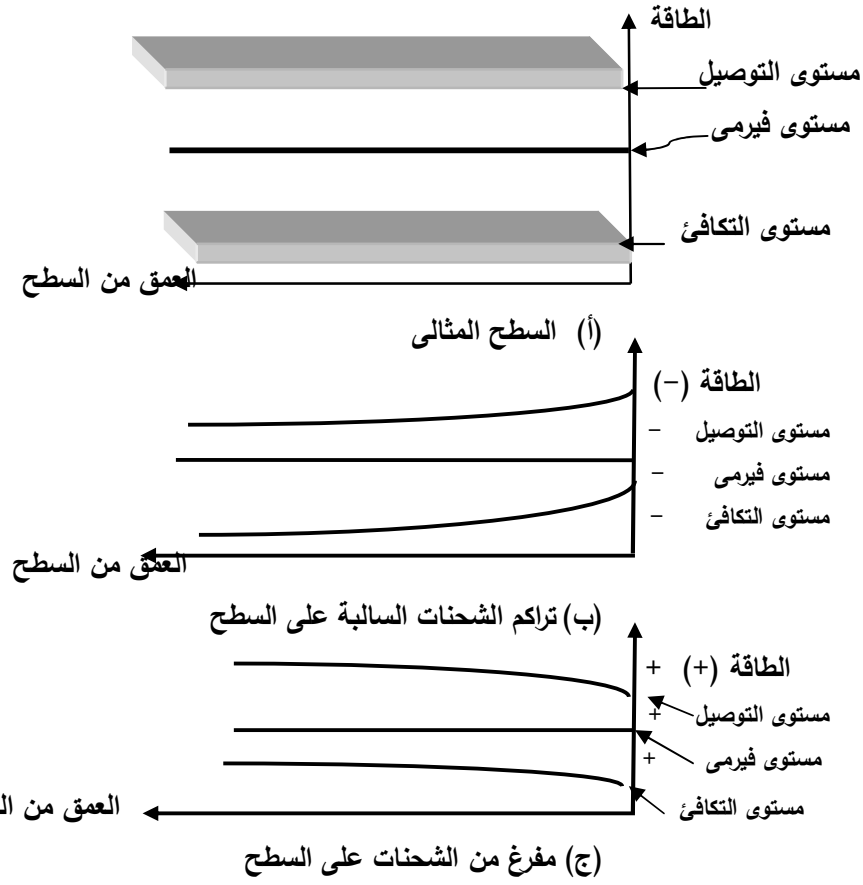
الفصل الرابع

نظرية الترانزستور أحادي القطب[1]

٤-١ تأثير أسطح عناصر أشباه الموصلات

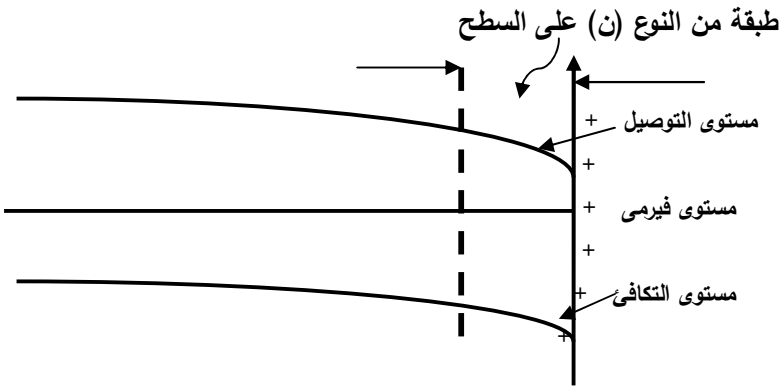
من المفترض أن تكون أسطح عناصر أشباه الموصلات الدايود والترانسستور مرآة مثالية لجميع الشحنات التى تصل الى السطح٠ والإستثناء الوحيد لهذا الإفتراض ما هو متعلق بكسب التيار فى الترانزستور حيث يؤثر إظهار تأثير سرعة إتحاد الشحنات على كسب الترانزستور ومعامل كسب التيار٠



الشكل (٤-١) مستويات الطاقة لمادة شبه موصل من النوع (ب) كدالة للعمق من السطح

[1] ((unijunction transistor (UJT)) هو عنصرإلكترونى شبه موصل بثلاث أطراف بوصلة واحدة فقط تعمل حصريا كعنصر تبديل يتم التحكم فية كهربائياً ولا يستخدم كمكبر خطى٠

يوضح الشكل (٤ –١) مستويات طاقة الإلكترونات كدالة للعمق من السطح لمادة شبه موصل مثالية من النوع (ب) ٠ يظهر هذا الشكل مستويات الطاقة ثابتة، حيث تكون كثافة الإلكترونات والثقوب واحدة سواء في عمق وسطح المادة ٠ نادراً ما يوجد هذا النوع من التوزيع في العناصر التطبيقية، ومن الخواص الكيمائية نجد السيليكون والجرمانيوم على حد سواء إلى حد ما مواد فعالة ، حيث يتفاعل السطح بسرعة جداً مع البيئة المحيطة تتسبب فى تكوين طبقة من مادة أيونية (قطبية) – تكتسب هذه الطبقة شحنة سطحية كما هو فى الشكل (٤–١)٠ فى الشكل (٤–١ ب) تظهر شحنات سطح سالبة ولذلك فإن مستوى طاقة الإلكترونات يميل الى الإنحناء الى أعلى بالقرب من السطح٠ هذا الإنحناء الى أعلى يتسبب فى نقل حافة مستوى التكافئ أقرب الى مستوى فيرمى وبالتالى تزداد تركيز التقوب بالقرب من السطح – يمكن القول أن هناك تراكم للشحنات الموجبة بالقرب من سطح المادة بسبب وجود شحنات سالبة على السطح٠ فى الشكل (٤–١ج) تتسبب الشحنات الموجبة على السطح فى إنحناء مستوى الطاقة الى الأسفل وبالتالى فإن مستوى التكافئ يبتعد عن مستوى فيرمى ويصبح السطح خاليا من الشحنات الموجبة (الثقوب)٠ تجدر الإشارة إلى أنه إذا كانت مادة شبه الموصل من النوع (ن) بدلاً من النوع(ب) ، فإن الشحنات السالبة سوف تستمر فى إنحناء مستويات الطاقة إلى أعلى كما في السابق٠ ومع ذلك، فإن مستوى التوصيل سيبتعد عن مستوى فيرمي حتى إستنفاذ الإلكترونات ويصبح السطح مفرغا من الشحنات السالبة٠ تتراكم الشحنات الموجبة على سطح المادة من النوع (ن) ويحدث تراكم إلكترونات نحو السطح للمواد من النوع (ب)٠ ومع إستمرار تعرض السطح الى مجال طاقة خارجى يستمر إنحناء مستويات الطاقة حتى يصبح السطح خاليا من الشحنات (كثافة الإلكترونات تساوى كثافة الثقوب) ويصبح مستوى فيرمى فى منتصف الفجوة الطاقية بين مستويات الطاقة لتصبح ذات تركيز متجانس وبزيادة المجال الخارجى يتحول سطح المادة الى طبقة ذات تركيز غير متجانس عكس الشحنات فى العمق بعيدا عن السطح (كثافة االشحنات السالبة لا تساوى كثافة الشحنات الموجبة) كما هو موضح بالشكل (٤–٢) ٠



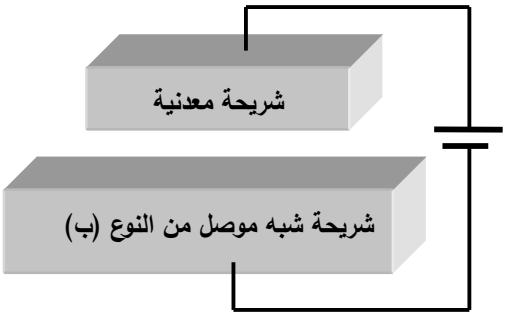
الشكل (٤-٢) مستويات الطاقة لمادة من النوع (ب) ذات سطح متحول

إذا تحولت موصلية طبقة السطح الى النوع (ن) – فسيتم التوصيل الكهربائى بالإلكترونات فى السطح المحول – وتنشأ طبقة مفرغة كعازل بين طبقة السطح المحول الى النوع (ن) ومادة شبه الموصل من النوع (ب) – تنشأ هذه الطبقة المفرغة من الشحنات الموجبة من إنحناء مستويات الطاقة الى الأسفل – ويشار الى الطبقة المحولة التى يتم فيها التوصيل بالإلكترونات بمسمى (قناه) ٠ إذا كانت القناة المشكلة على سطح الوصلة الثنائية كنتيجة تلوث سطحي فستسبب فى زيادة مساحة الوصلة والذى يؤثر فى قيم تيار التسرب٠ إذا كانت القناة المشكلة أعلى طبقتى الوصلة متقاربة ، فسوف تتأثر جميع خصائص الترانزستور٠ ينبغي أن يكون من الواضح أن تشكيل القناة حالة غير مرغوب فيها في الترانزستورات تنائية القطب والدايود٠

- **نأثير المجالات الخارجية على أسطح مواد أشباه الموصلات**

بوضع شريحة معدنية أعلى سطح مادة شبه موصل من النوع (ب) وتوصيل بطارية بين الشريحتين ،الشكل (٤-٣) فسيتم تفريغ سطح مادة شبه موصل من الشحنات الموجبة (الثقوب)٠ كما سبق الحديث فإن الجهد على شريحة شبه الموصل سيتسبب فى تناقص مستويات طاقة الإلكترونات بالقرب من السطح ويتطلب لحالة إتزان الشحنات أن تكون الشحنات المتولدة والمؤثرة مساوية للشحنات على سطح الشريحة المعدنية٠ سوف

تتساوى الشحنات فى مادة شبه الموصل مع الشحنات الكلية لذرات الشوائب المتواجد فى المادة فى المنطقة التى إنحنت فيها مستويات الطاقة.



الشكل (٤-٣) الجهد الواقع على شريحة معدنية وشريحة شبه موصل

يمكن حساب قيمة السعة بين الشريحتين المعدنية وشبة الموصل كما يلى:

$$C_o V_G = q N_A X_d A$$ المعادلة (٤-١)

تمثل (C_o) السعة بين الشريحتين المعدنية وشبه الموصل و(V_G) الجهد بين الشريحتين و(N_A) كثافة الشوائب المستقبلة و(X_d) العمق المتأثر بالمجال الكهربائى فى مادة شبه الموصل و(A) المساحه المعرضة للمجال أسفل الشريحة المعدنية. إفترضت المعادلة (٤-١) بأن سطح مادة شبه الموصل مثالي وأن قيمة الجهد المؤثر ذو قيمة صغيرة حيث لا يتحول السطح لينشأ قناه. بزيادة الجهد أعلى من القيمة التى تحافظ على جوهرية وتجانس السطح بتعادل الشحنات الموجبة والسالبة – سوف تتسبب الزيادة فى الجهد فى تحويل موصلية السطح وتكوين قناة سطحية. تعمل القناة الناشئة كحاجز لمنع المزيد من إختراق االمجال الكهربائي لعمق أكبر فى مادة شبه الموصل. كل الشحنات المتولدة فى مادة شبه الموصل تتكون من ذرات الشوائب المتواجدة فى مادة شبه الموصل علاوة على شحنات الإلكترونات فى القناه.

$$C_o V_G = q N_A X_d A + n q LWT$$ المعادلة (٤-٢)

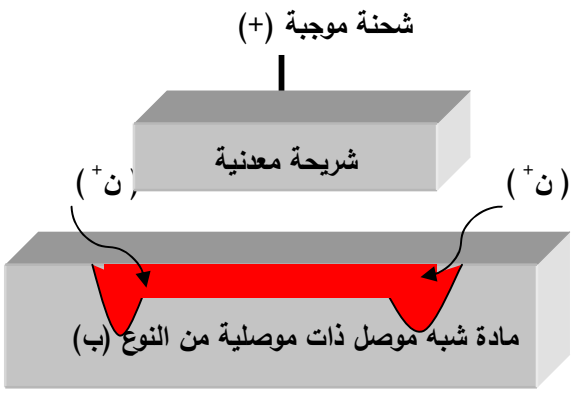
ويمكن التعبير عنها كما يلى:

$$C_o V_G = C_o V_T + n q LWT$$ المعادلة (٤-٣)

حيث (n) كثافة الإلكترونات فى القناه وتمثل كل من (W) العرض و(L) الطول و(T) العمق أبعاد القناه٠ فى حالة تساوى الجهد بين الشريحتين مع الجهد االمحافظ على جوهرية وتجانس السطح ($V_G = V_T$) وبحل المعادلة (٤-٣) – يمكن الحصول على كثافة الإلكترونات فى القناة٠

$$n = \frac{C_o (V_G - V_T)}{qLWT}$$ المعادلة (٤-٤)

وبعمل وصلة بين نهايتى القناة كما هو موضح بالشكل (٤-٤) سينشأ منطقتين ذات كثافة إلكترونات زائدة من خلال ظاهرة الإنتشار٠



الشكل (٤-٤) تشكيل قناة موصلة فى مادة شبه موصل ذات موصلية (ب)

يمكن حساب قيمة الموصلية (G) للقناة المنشأة على النحو التالى :

$$n = n\,\mu\,q = \frac{C_o\,\mu\,(V_G - V_T)}{L\,W\,T}$$ المعادلة (٤-٥)

$$G = \frac{\sigma A}{L} = \frac{C_o \mu (V_G - V_T)}{L^2}$$ المعادلة (٤-٦)

$$G = \frac{\sigma A}{L} = \frac{C_o \mu (V_G - V_T)}{L^2}$$ المعادلة (٤-٧)

حيث (C_O) السعة لوحدة المساحات الواقعة تحت الشريحة المعدنية لشريحة شبه الموصل٠ تعتبر قيمة الموصلية بين نهايتى القناة دالة لشكل القناة – وأيضا معامل

العزل للمادة فى الفراغ بين الشريحتين والجهد الواقع على شريحة شبه الموصل٠ مع مراعاة تغير قيمة موصلية القناة فى حالة تغير الجهد الواقع على شريحة شبه الموصل٠

٤-٢ الترانزستور المتأثر بالمجال ذات البوابة المعزولة[٢]

يطلق على ما سبق وصفه الترانزستور المتأثر بالمجال ذات البوابة المعزولة ويشار له بالرمز٠ الوصلتين فى نهايتى القناة يطلق علي إحداها إسم المنبع والآخر إسم النازف بينما يطلق على الشريحة المعدنية إسم البوابة٠ يسرى تيار كهربائى من المنبع الى النازف بقليل من الجهد على وصلة النازف ويمكن حساب قيمة التيار المنزوف على النحو التالى:

$$I_D = V_d G = \frac{V_D C_G \mu (V_G - V_T)}{L^2}$$ المعادلة (٤-٨)

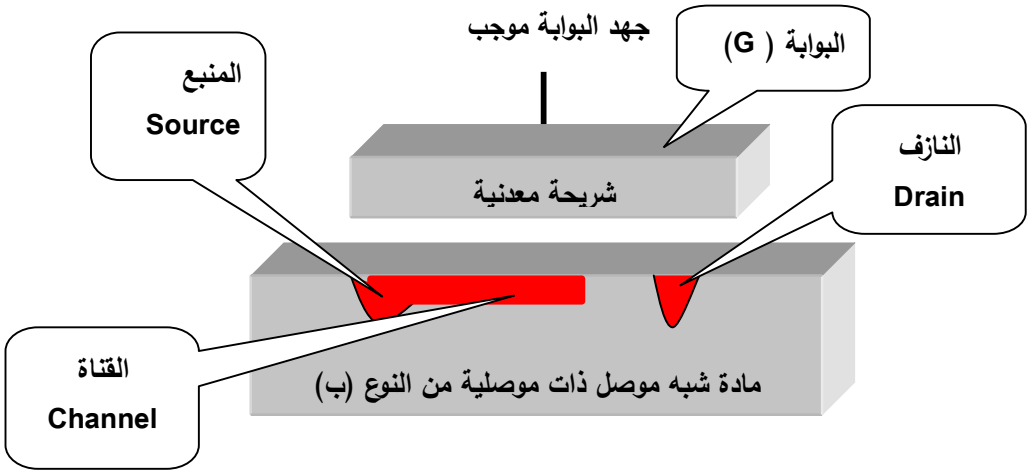
حيث (C_G) السعة بين البوابة الى القناة٠ مع ملاحظة أن السعة بين المنبع والنازف غير مؤثرة فى كثافة الإلكترونات داخل القناة٠ يفترض بقليل من الجهد (V_d) على النازف إعتبار القناة متعادلة الجهد٠ فى حال إستمرار جهد البوابة ثابت بينما يتزايد الجهد على النازف (V_d) بشكل خطى كما هو موضح بالمعادلة (٤-٨) ٠ ومع ذلك فى وجود جهد عالى على النازف سيصل التيار الى حالة تشبع وبالتالى بزيادة جهد النازف أعلى من قيمته عند نقطة التشبع لا ينتج عنه زيادة فى التيار – يطلق على قيمة الجهد الذى يصل فيه التيار الى حالة التشبع بإيقاف إندفاع الجهد[٣] ٠

---

[٢] (*insulated-gate FET (IGFET)*) فى الترانزستور المتأثر بالمجال يمكن أن يتكون القناة المنشأة إما من مواد شبة الموصل النوع (ن) أو النوع (ب) – طرف البوابة من قطعة معدنية ات سطح مؤكسد٠ طبقة الأكسيد تعزل كهربائياً البوابة عن القناة٠لهذا السبب تمت التسمية الترانزستور المتأثر بالمجال ذات البوابة المعزولة٠ ولكن نادرا ما تستخدم هذه التسمية الآن لأن طبقة أكسيد تقوم مقام العازل، هناك ابدأ أي الحالية أساسا بين البوابة والقناة خلال أي جزء من دورة إشارة٠ وهناك أساسا لا يوجد تيار بين البوابة والقناة أثناء أى جزء من الإشارة٠

[٣] (**Pinch off voltage**) فى الترانزستور المتأثر بالمجال ذات الوصلة – عندما يكون الجهد بين البوابة والمنبع (**Vgs**) يساوى صفر وأن وصلة النازف الى المنبع ذات إنحياز أمامى سيسرى تيار ٠ مما يتسبب فى تناقص المنطقة

وللمزيد من التوضيح – بزيادة الجهد على النازف يتزايد التيار فى القناه٠ ينشأ جهد وبالتالى يتقلص الفرق فى الجهد بين البوابة وجهد النازف فى القناة والمفترض أن تكون قيمته ثابته٠ فى حالة سريان تيار بسيط فإن الفرق فى الجهد ستكون قيمته صغيرة بما يكفي أن لم يتم زيادة الجهد على النازف ويحدث التشبع فى التيار كما هو موضح بالشكل (٤-٥)٠ عند مرحلة التشبع فإن الجهد من المنبع الى النقطة حيث يحدث إيقاف إندفاع الجهد[٣] هى ($V_G - V_T$)٠



الشكل (٤- ٥) الترانزستور المتأثر بالمجال ذات البوابة المعزولة موضح إيقاف إندفاع الجهد

حيث أن نقطة إيقاف إندفاع الجهد بالقرب من النازف فإن طول منطقة التحول فى القناة تقريبا هى المسافة من المنبع الى النازف٠ من معادلة حركية الشحنات – نجد :

$$\mu = \frac{L^2}{(V_G - V_T)}$$

العازلة بين القناة والبوابة – قيمة تيار النازف هو تيار التشبع (Idss) ٠ وفور تحول الجهد بين البوابة والمنبع (Vgs) الى إنحياز سالب (Vgs < 0) بمعنى أن الجهد بين البوابة والمنبع جهد عكسى مما يتسبب فى زيادة سمك المنطقة العازلة داخل القناةمما يقلل سريان التيار ٠ وبزيادة الإنحياز السالب بين البوابة والمنبع يتناقص تيار النازف ٠ وبزيادة إنحياز العكسى بين البوابة والمنبع (Vgs) – عند جهد معين (Vgs) فإن المنطقة العازلة تمتد على كل القناةوبالتالى لا يمر تيار ويصبح تيار النازف يساوى صفر وهذا ما يسمى إيقاف إندفاع الجهد٠

كما يمكن إيجاد السرعة المتوسطة للشحنات فى القناة على النحو التالى-:

$$g_D = \frac{\mu(V_G - V_T)}{L}$$ المعادلة (٤-٩)

بتغيير الشحنات فى القناة الى الشحنات فى المادة العازلة نتيجة الجهد على البوابة والنازف – نحصل على :

$$\Delta Q = (C_G \Delta V_G + C_D \Delta V_D)$$ المعادلة (٤-١٠)

حيث (C_D) السعة بين النازف والقناة – يحتسب التغير فى تيار النازف كما يلى:

$$\Delta I_d = \Delta Q \frac{g_D}{L} = (C_G \Delta V_G + C_D \Delta V_D) \frac{g_D}{L}$$ المعادلة (٤-١١)

لحساب معامل التكبير(A) فإن التغير فى جهد النازف والذى يمثل التغير فى جهد البوابة – مع ثبات قيمة تيار النازف (I_D) ومن ثم من المعادلة (٤-١١) نجد:

$$C_G \Delta V_G = -C_D \Delta V_D$$

و المعادلة (٤-١٢) $$A = -\frac{\Delta V_D}{\Delta V_G} = \frac{C_G}{C_D}$$

من المعدلات (٤-٩) والمعادلة (٤-١١) – نحصل على :

$$\Delta I_d = (C_G \Delta V_G + C_D \Delta V_D) \frac{\mu(V_G - V_t)}{L^2}$$ المعادلة (٤-١٣)

ولحساب مقاومة النازف (r_d) والتى تمثل مقاومة خرج الترانزستور – يتم التعويض عن قيمة جهد البوابة ($V_G = 0$)

$$r_d = -\frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} = \frac{L^2}{C_D \mu (V_G - V_T)}$$ المعادلة (٤-١٤)

بالتعويض عن قيمة جهد النازف بالقيمة صفر ($V_D = 0$) يمكن حساب الموصلية

$$g_m = -\frac{\Delta I_D}{\Delta V_G} = \frac{C_G \mu (V_G - V_t)}{L^2}$$ المعادلة (٤-١٥)

الصيغ السابقة توضح آلية تشغيل الترانزستور أحادى القطب بصفة عامة بينما فى التطبيقات العملية فهى أكثر تعقيدا ولكن الأساسيات هى نفسها٠

٤-٣ الترانزستور المتأثر بالمجال[٤]

الترانزستور المتأثر بالمجال هو عنصر من ثلاث أطراف وهو ترانزستور أحادى القطبية حيث أن التيار ينتج من سريان أحد نوعى الشحنات – السالبة (الإلكترونات) أو الشحنات الموجبة (الثقوب) – إسم الترانزستور المتأثر بالمجال ورد من حقيقة أنه يمكن التحكم فى التيار بإستخدام جهد خارجى وهناك نوعين أساسيين للترانزستور المتأثر بالمجال – يشار الى النوع الأول بإسم الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة ويشار الى النوع الثانى الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين معدن– أكسيد – سليكون ويتم تصنيع كلا النوعين كمكونات منفصلة أو أحد مكونات لدائرة متكاملة٠ يعتير الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين معدن– أكسيد– شبه موصل من أهم المكونات فى الدوائر المتكاملة الرقمية الحديثة مثل الميكروبرسسور ودوائر ذاكرات الحواسب٠

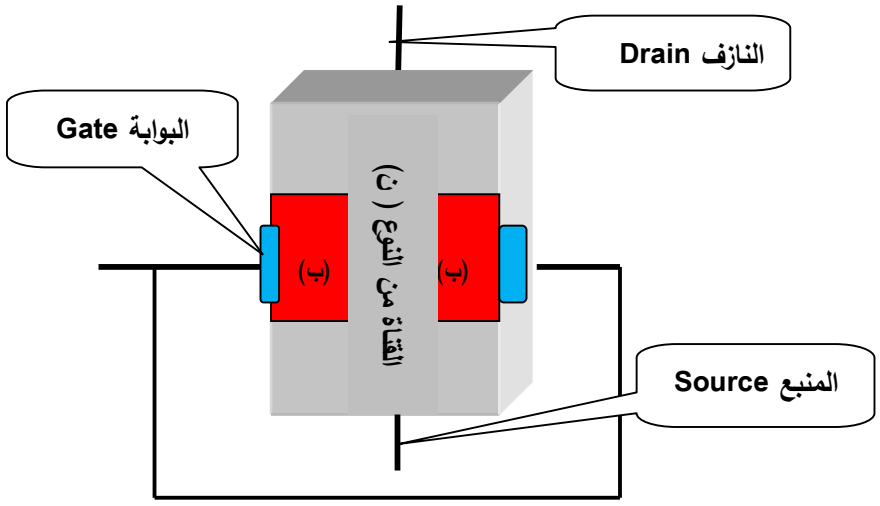
٤-٣-١ الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة

يوضح الشكل (٤- ٦) تكوين هذا النوع – والذى يتكون من شريحة من مادة شبه موصل (ن) بها منطقتين من مادة شبه موصل (ب)٠ المنطقتين من مادة شبه موصل (ب) متصلين كهربائيا – الوصلة المشتركة بينهما تسمى طرف البوابة والطرفين الآخران – عند نهايتى المادة شبه موصل (ن) ويشار لهما بالنازف والمنبع ٠ المادة شبه موصل (ن) بين المنطقتين شبه موصل (ب) تسمى قناة٠ ولذلك تحدد المادة المكونة للقناة نوع الترانزستور (الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة ذات قناة من نوع (ن) أو الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة ذات قناة من نوع (ب) وقد يكون للمزيد من التوضيح إعتبار منطقة النازف كأنها المجمع ومنطقة المنبع كأنها الباعث والبوابة كأنها القاعدة فى الترانزستور ثنائئ القطبية٠ يتحكم الجهد الواقع على البوابة فى سريان

---

[٤] هناك نوعين من الترانزستور المتأثر بالمجال والمشار له بالأحرف (FET) – النوع الأول بإسم الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة (JFET) ويشار الى النوع الثانى الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين معدن– أكسيد – سليكون (MOSFET)

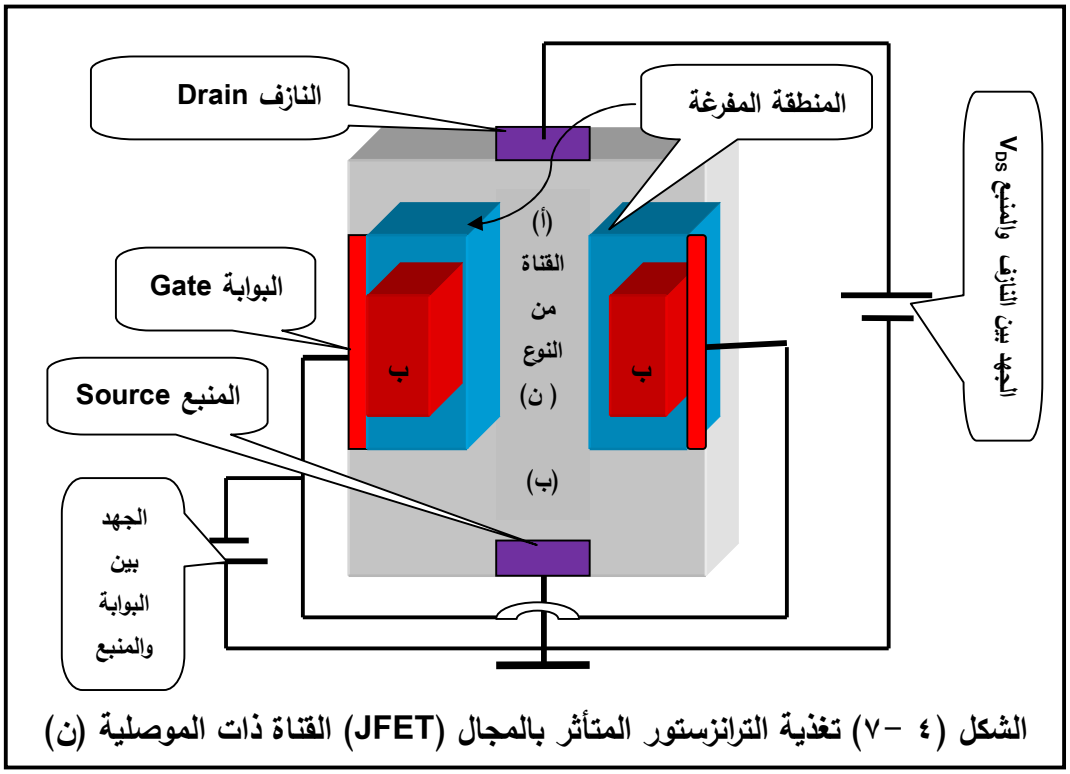
التيار بين النازف والمنبع بالمثل كأنه إدخال إشارة الى قاعدة الترانزستور ثنائئ القطبية التى تتحكم فى سريان التيار بين المجمع والباعث٠ عند توصيل جهد خارجى بين النازف والمنبع لترانزستور ذات قناة (ن) لذلك فأن المنبع متصل بفولتية عكسية (تغذية النازف موجبة بالنسبة الى تغذية المنبع) – يسرى التيار بتدفق الإلكترونات خلال القناة (ن) من المنبع الى النازف إلا أن مقاومة القناة تقلل من سريان التيار٠ فى آلية التشغيل العادية يتم تطبيق جهد خارجى بين البوابة والمنبع ومن ثم فإن تغذية الوصلة بين نوعيتى المادتين فى كل جانب من القناة تغذية عكسية٠ وبالتالى يصبح جهد البوابة سالب بالنسبة الى جهد المنبع مما يجعل تغذية البوابة عكسية وتنشأ منطقة مفرغة لكل من الوصلتين لتكوين القناة٠ كثافة الشوائب قليلة فى مادة القناة (ن) بالنسبة الى كثافة البوابة (ب) وبالتالى يتزايد سمك المنطقة المفرغة داخل القناة٠



الشكل (٤ –٦) تكوين الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة بقناة (ن)

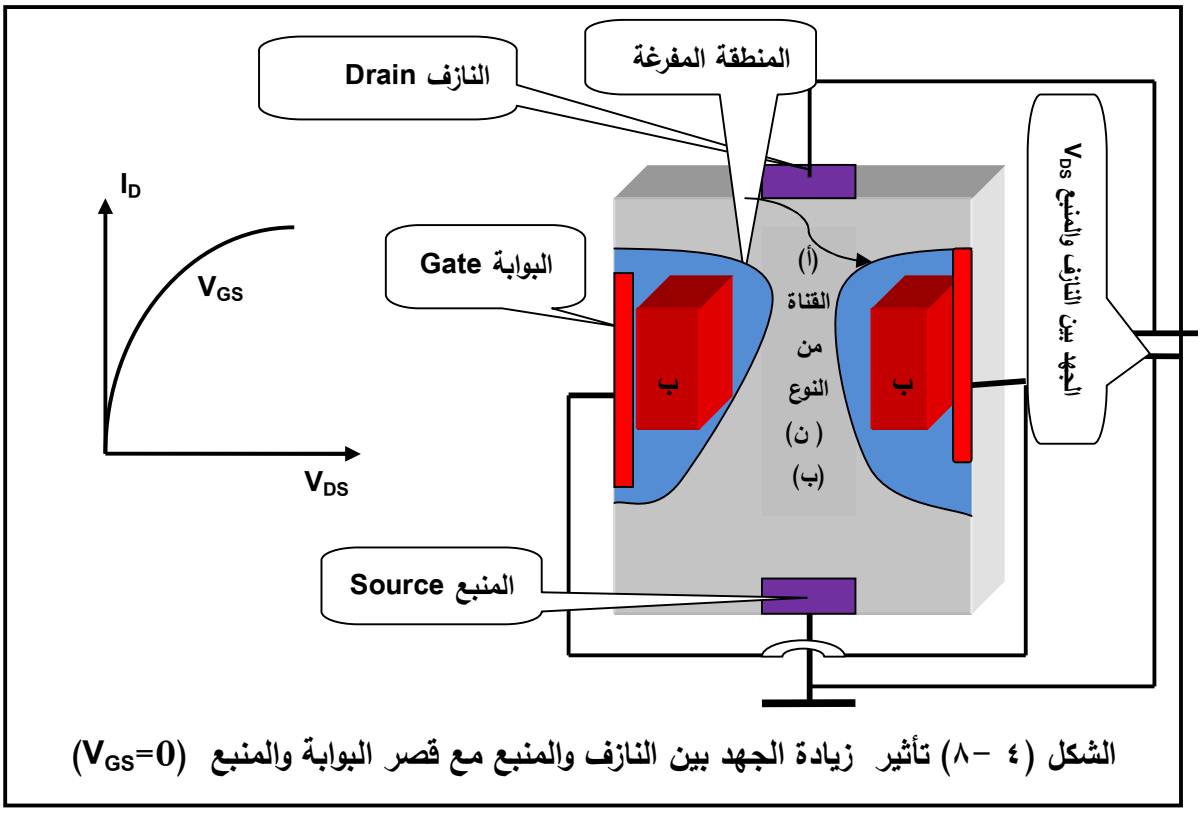
يعتمد سمك المنطقة المفرغة على مقدار جهد التغذية العكسية بين البوابة والمنبع٠ بزيادة الجهد (V_{GS}) يزاداد سمك المنطقة المفرغة ويتناقص إتساع القناة مما يتسبب فى زيادة مقاومة القناة ويتناقص تيار النازف٠ وبتوصيل طرفى البوابة والمنبع مما يعنى أن

الجهد بين البوابة والمنبع يساوى صفر ($V_{GS}=0$) – وبزيادة الجهد بين النازف والمنبع يتزايد تيار النازف (الشكل ٤–٧)٠ مع ملاحظة أن سريان تيار النازف خلال القناة ينشئ جهد على طول القناة ٠ بالقرب من أعلى فإن الجهد الواقع على القناة يساوى الجهد بين النازف والمنبع – وبالتالى نجد جهد تغذية عكسى بين القناة (ن) والبوابة (ب) مما يتسبب فى إتساع المنطقتين المفرغتين بالقرب من نهاية النازف (أ) فى القناة بالمقارنة عن المنطقة بالقرب من نهاية النازف (ب) فى القناة بالقرب من المنبع٠ ونتيجة لذلك فإن جهد التغذية العكسى بين القناة (ن) والبوابة (ب) يتناقص ويقل سمك المنطقتين المفرغتين كلما إقتربنا من المنبع٠



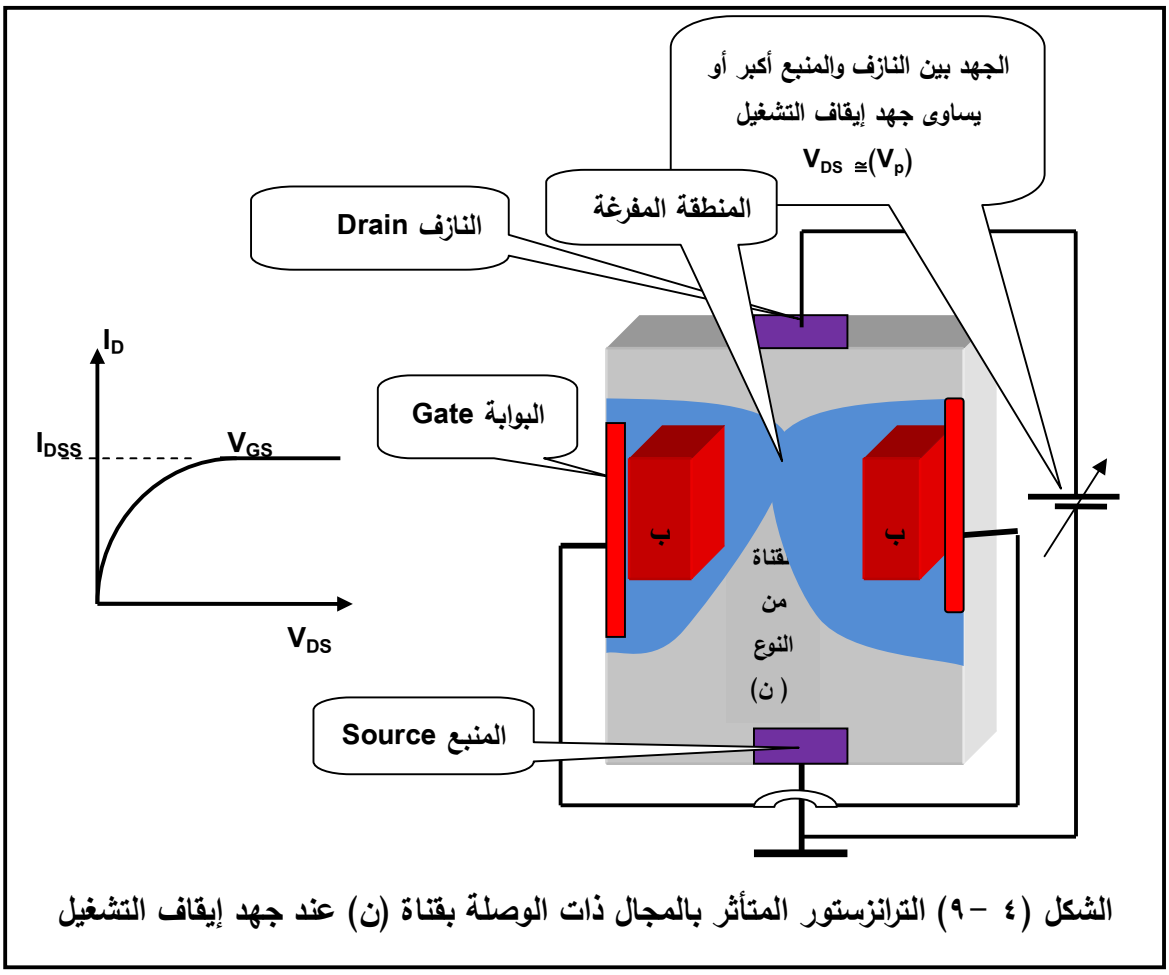
الشكل (٤ –٧) تغذية الترانزستور المتأثر بالمجال (JFET) القناة ذات الموصلية (ن)

بتزايد الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) أكثر – تمتد المنطقتين المفرغتين ويقل عرض القناة بالقرب من الطرف (أ) وبالتالى تتزايد المقاومة الكلية للقناة ويبدأ التيار يتناقص الى مستوى القطع كما هو مبين بمنحنى الخواص فى الشكل (٤– ٨)٠



الشكل (٤ –٨) تأثير زيادة الجهد بين النازف والمنبع مع قصر البوابة والمنبع ($V_{GS}=0$)

يوضح الشكل (٤–٩) إتساع المنطقة المفرغة داخل القناة بزيادة الجهد بين النازف والمنبع حتى يصبح سمك القناة يساوى صفر – تسمى هذه الحالة إيقاف إندفاع الجهد[٣] والتى يتحكم فيها كثافة الشوائب والشكل الهندسى للترانزستور. عند نقطة إيقاف إندفاع الجهد (V_p) تصبح تغذية الوصلة بين البوابة والقناة تغذية عكسية بقدر قيمة الجهد بين النازف والمنبع. نجد دائما أن إيقاف إندفاع الجهد سالب الفولتية بالنسبة الى القناة (ن) وموجب الفولتية بالنسبة الى القناة (ب) لنوع الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة . نجد فى منحنيات الخواص لتيار النازف بالنسبة الى الجهد أن تيار النازف يصل الى قيمته القصوى عند قيمة إيقاف إندفاع الجهد ويستمر تيار النازف فى السريان بقيمته القصوى طالما كان الجهد بين النازف والمنبع بعيدا عن نقطة إيقاف إندفاع الجهد. يسمى هذا بتيار التشبع ويرمز له (I_{Dss}) وهو التيار المار من النازف الى المنبع عند قصر البوابة.



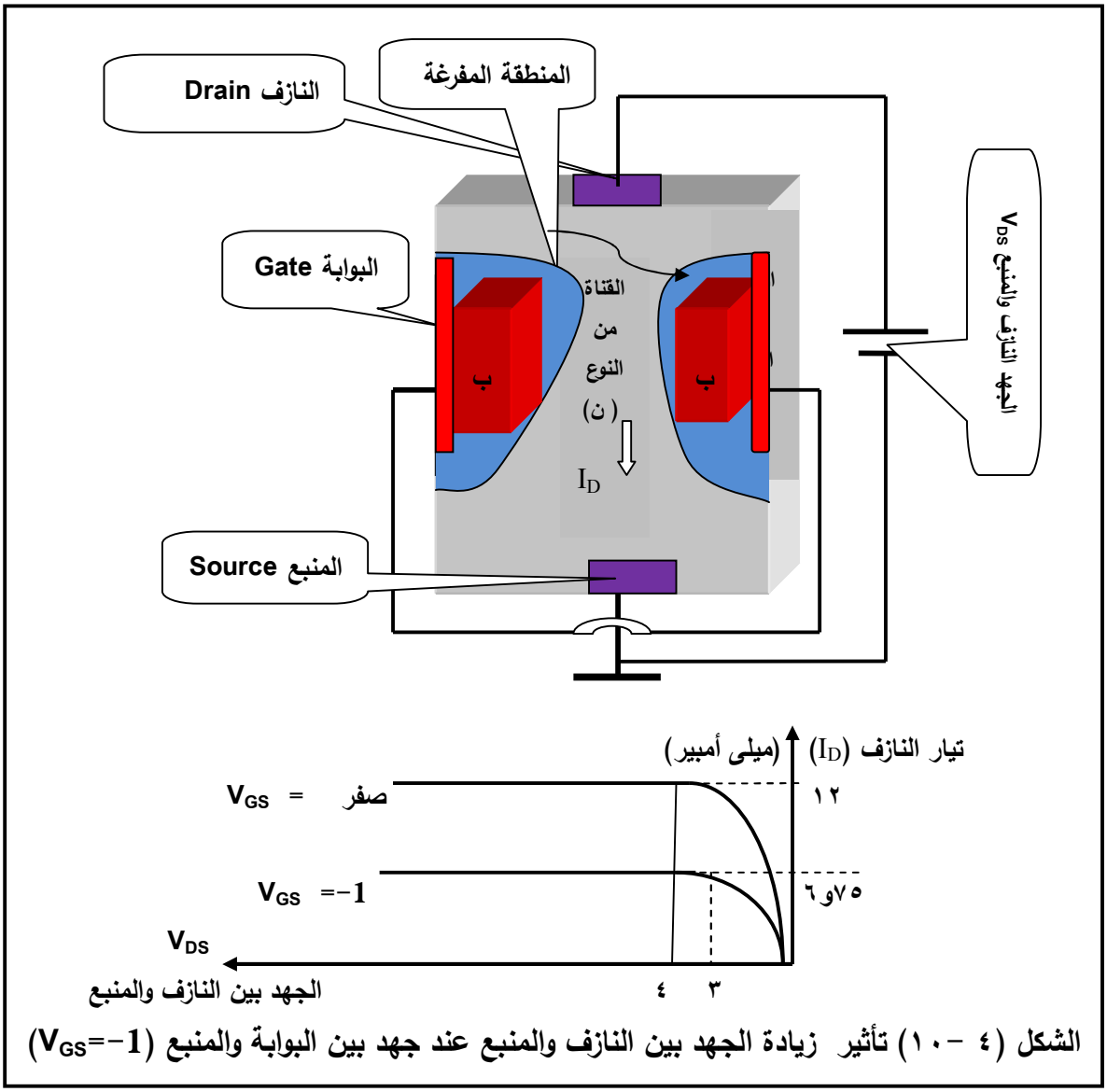
الشكل (٤ – ٩) الترانزستور المتأثر بالمجال ذات الوصلة بقناة (ن) عند جهد إيقاف التشغيل

إستمرار سريان تيار التشبع هو نوع من التحكم الذاتى أو عنصر إتزان يتحكم فى التيار عندما يتساوى الجهد بين النازف والمنبع مع إيقاف إندفاع الجهد ($V_{DS}= V_p$) ويمكن توضيح ذلك – بزيادة الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) يتزايد تيار الإلكترونات (I_n) وبالتالى يتزايد الجهد الواقع على القناة والذى يتسبب فى إتساع المنطقتين المفرغتين مما يتسبب فى تناقص التيار ، بالطبع فإن التغير فى تيار النازف لا يحدث أبدا في الواقع ويستمر تيار النازف كما يستمر تيار التشبع ، فى الشكل (٤–١٠) تم إلغاء قصر البوابة وتغذيتها بجهد عكسى (V_{GS} = -1V) مما يتسبب فى إمتداد المنطقتين المفرغتين فى القناة على طول البوابة فى القناة وبزيادة الجهد (V_{DS}) يتزايد تيار النازف خطيا كما هو موضح بالشكل (٤–١٠) وتقترب المنطقتين المفرغتين من بعضهما بالقرب

من النازف مما يتسب فى تناقص عرض القناة وترتفع المقاومة ويدخل التيار لمستوى القطع – وحيث أن الجهد بين النازف والمنبع يساوى الفرق بين الجهد بين البوابة والمنبع سالب قيمة إيقاف إندفاع الجهد ٠

$$V_{DS} = V_{GS} - V_p$$ المعادلة (٤-١٦)

بتناقص قيمة إيقاف إندفاع الجهد يتناقص الجهد بين البوابة والمنبع حتى يصل التيار الى تيار التشبع عند قيم أقل أو بتزايد الجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) يتناقص الجهد بين النازف والمنبع وينتج تيار تشبع بسيط (الجدول ٤-١)



الشكل (٤ -١٠) تأثير زيادة الجهد بين النازف والمنبع عند جهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}=-1)

الجدول (٤-١)

الجهد بين البوابة والمنبع $V_{GS}(V)$	الجهد بين النازف والمنبع $V_{DS}(V)$	تيار التشبع $I_{DSS}(ma)$
صفر	٤	١٢
-١	٣	٦و٧٥
-٢	٢	٣

الشكل (٤-١١) يوضح منحنيات الخواص لتيار التشبع بالنسبة للجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) لقيم جهد بين البوابة والمنبع واحدة – يمثل منحنى القطع المكافئ النقاط التي يحدث فيها إيقاف إندفاع الجهد (Vp) لكل جهد بين البوابة والمنبع ٠ يسمى الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) على القطع المكافئ جهد التشبع ($V_{DS[SAT]}$) ٠

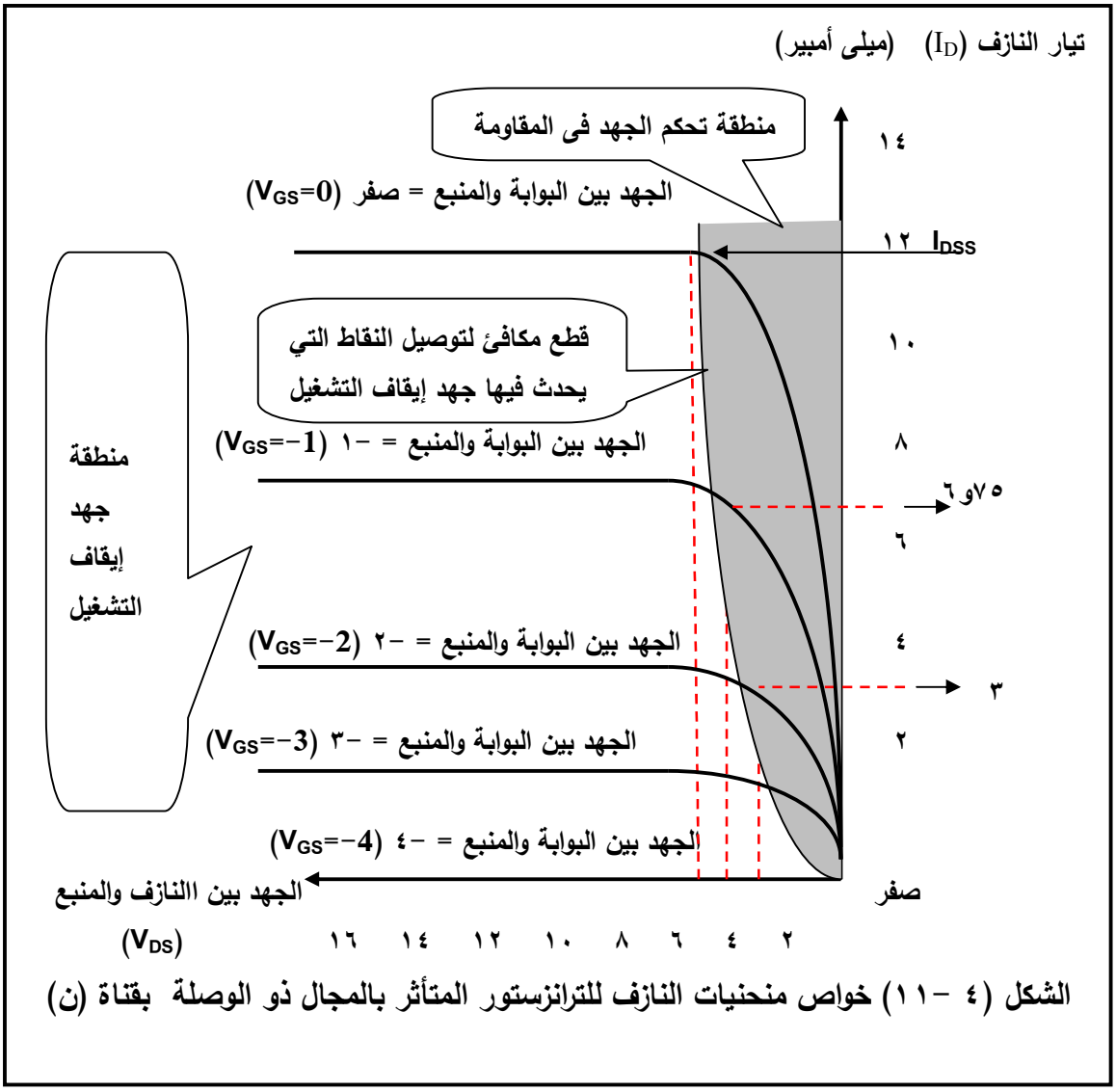
$$V_{DS[SAT]} = V_{GS} - V_p$$ **المعادلة (٤-١٧)**

$$I_D = I_{DSS}\left[\frac{V_{DS}\,|_{SAT}}{V_p}\right]^2$$ **المعادلة (٤-١٨)**

على سبيل المثال إذا كانت قيمة إيقاف إندفاع الجهد (Vp) = -٤ فولت وتيار التشبع (I_{DSS}) يساوى ١٢ ميلى أمبير عند الجهد بين النازف والمنبع = ٣ فولت – نحصل على قيمة تيار النازف ٠

$$I_D = 12\left[\frac{3}{-4}\right]^2 = 6.75ma$$

تيار التشبع عند الجهد بين البوابة والمنبع يساوى -١ فولت فى (الشكل ٤ -١١) نفس النتائج فى حالة إستخدام العلاقة بين الجهود ($V_{DS} = V_{GS} - V_p$) والتى تؤدى الى القيمة -١ ٠



الشكل (٤ -١١) خواص منحنيات النازف للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة بقناة (ن)

من (الشكل٤ -١١) عند قيمة الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) يساوى ٣ فولت والجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) يساوى -١ فولت نجد أن قيمة تيار التشبع تساوى ٦و٧٥ ميلى أمبير٠ فى (الشكل ٤ -١١) المنطقة الى يسار القطع المكافئ تسمى منطقة إيقاف إندفاع الجهد وهى المنطقة التى يعمل فيها الترانزستور المتأثر بالمجال عند إستخدامة لتكبير الإشارات الصغيرة٠ المنطقة على يمين القطع المكافئ تسمى

منطقة تحكم الجهد فى المقاومة أو منطقة المقاومة[٥] – فى هذه المنطقة تتحكم قيمة الجهد بين البوابة والمنبع فى المقاومة بين النازف والمنبع ولذلك فإن أحد التطبيقات الهامه إستخدام الترانزستور المتأثر بالمجال كعنصر تحكم فى الجهد٠ عندما يتساوى الجهد بين البوابة والمنبع مع قيمة إيقاف إندفاع الجهد ($V_{GS} = V_p$) تتلاقى المنطقتين المفرغتين على طول القناة وينقطع تيار النازف ٠ فى الشكل (٤ –١١) عندما يتساوى الجهد بين البوابة والمنبع وقيمة إيقاف إندفاع الجهد ($V_{GS} = -4\ V = V_p$) نجد قيمة تيار التشبع يساوى صفر ($I_{DSS} = 0$) – فى هذه الحالة يسمى إيقاف إندفاع الجهد (V_p) جهد القطع بين البوابة والمنبع ويمكن الوصول لجهد القطع بين البوابة والمنبع فى حالتين بإستخدام منحنيات خواص النازف٠

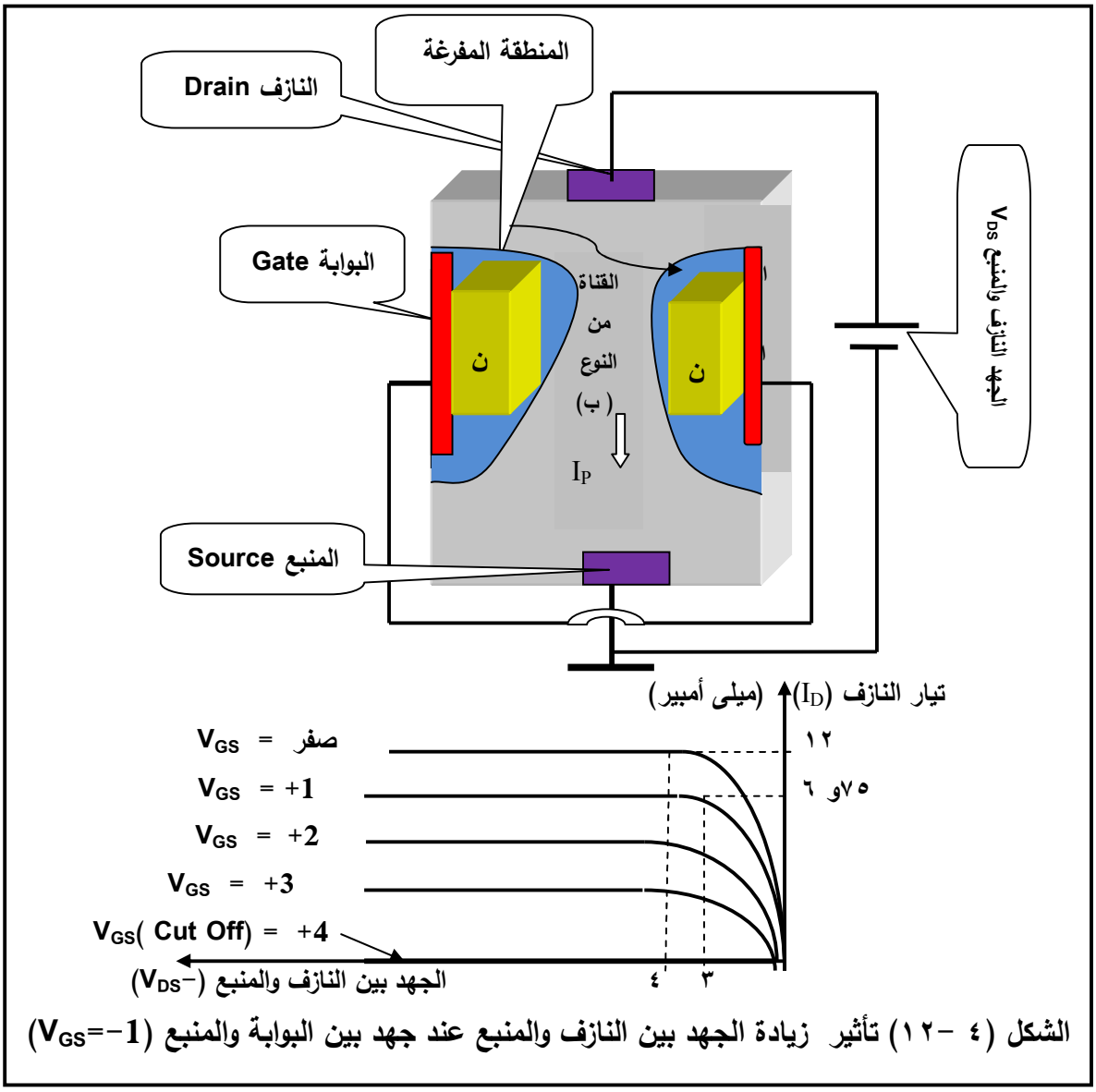
١. قيمة الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) عند تيار النازف يساوى تيار التشبع ($I_D = I_{DSS}$) عند الجهد بين البوابة والمنبع يساوى صفر ($V_{GS} = 0\ V$)

٢. قيمة الجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) عند تيار النازف يساوى صفر($I_D = 0$) عند قيمة إيقاف إندفاع الجهد تساوى جهد القطع بين البوابة والمنبع ($V_p = V_{GS[CUT\text{-}OFF]}$)

يستخدم الترانزستور المتأثر بالمجال مكبر جهد حيث أن مقاومة الدخل عند البوابة قيمة كبيرة٠ يوضح الشكل (٤– ١٢) تكوين وخواص ترانزستور المتأثر بالمجال ذات القناة من النوع (ب) وبالتالى فإن التيار الناتج هو نتيجة للشحنات الموجبة (الثقوب) جميع االخواص معكوسة للترانزستور المتأثر بالمجال ذات القناة من النوع (ن)٠

---

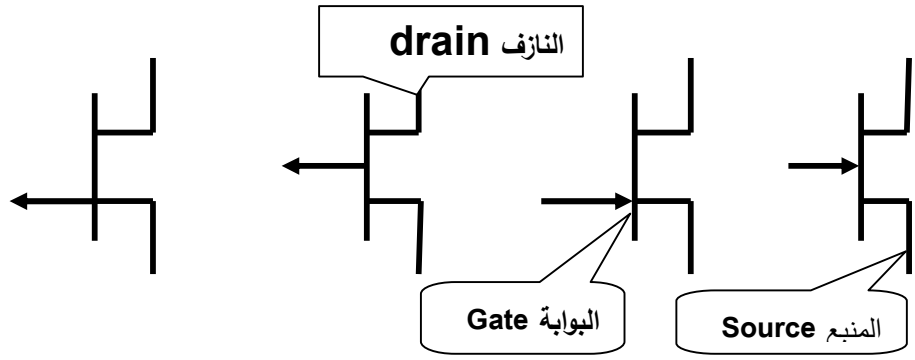
٥ (VOLTAGE CONTROLLED RESISTANCE, or OHMIC or TROIDE region,) – عند قيمة جهد بين البوابة والمنبع يساوى صفر – المنطقة المفرغة من القناة صغيرة جدا يؤثر كما لو كان مقاومة يتم التحكم فيها من خلال تغيير قيم الجهد٠



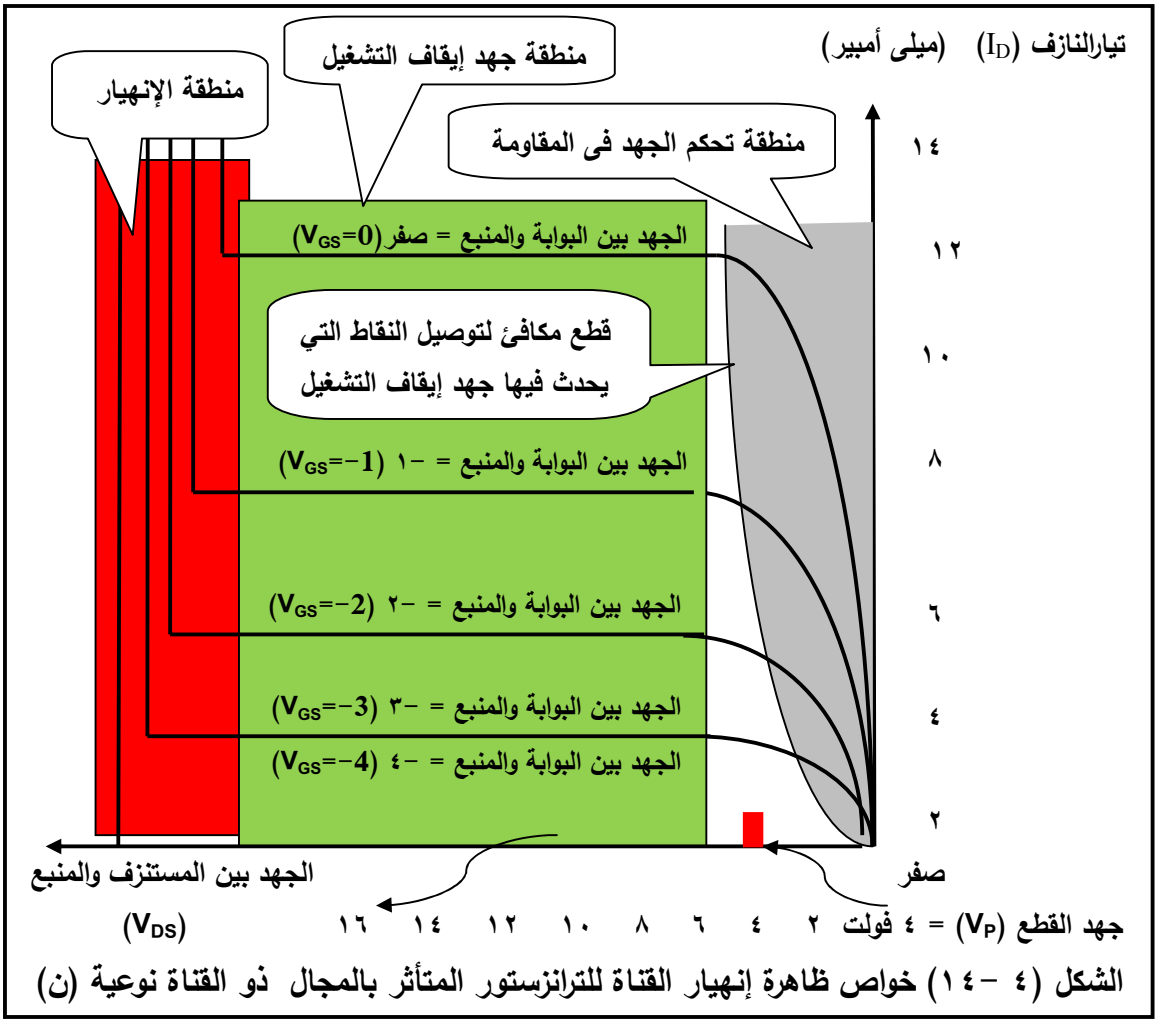
الشكل (٤ -١٢) تأثير زيادة الجهد بين النازف والمنبع عند جهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}=-1)

يوضح الشكل (٤-١٣) الرموز المستخدمة للتعريف بنوع موصلية القناة للترانزستور المتأثر بالمجال سواء كانت من النوع (ن) أو من النوع (ب) ٠ عندما يشير السهم الى داخل البوابة فهذا يعنى نوع القناة (ن) وعندما يشير السهم الى خارج البوابة فهذا يعنى نوع القناة (ب) ٠ تستخدم بعض أنواع الترانزستور المتأثر بالمجال بإحلال طرف النازف بدلا من طرف المنبع والعكس فى هذه الحالة فإن طرف البوابة يقع فى منتصف البوابة –

إذا كان طرف البوابة يقع فى منتصف البوابة ولكنه أقرب الى طرف المنبع فهذا يعنى ضرورة مراعاة إشارات الفولتية عند تغذية الترانزستور ٠



الشكل (٤ –١٣) الرموز المستخدمة للتعريف نوع موصلية القناة للترانزستور المتأثر بالمجال



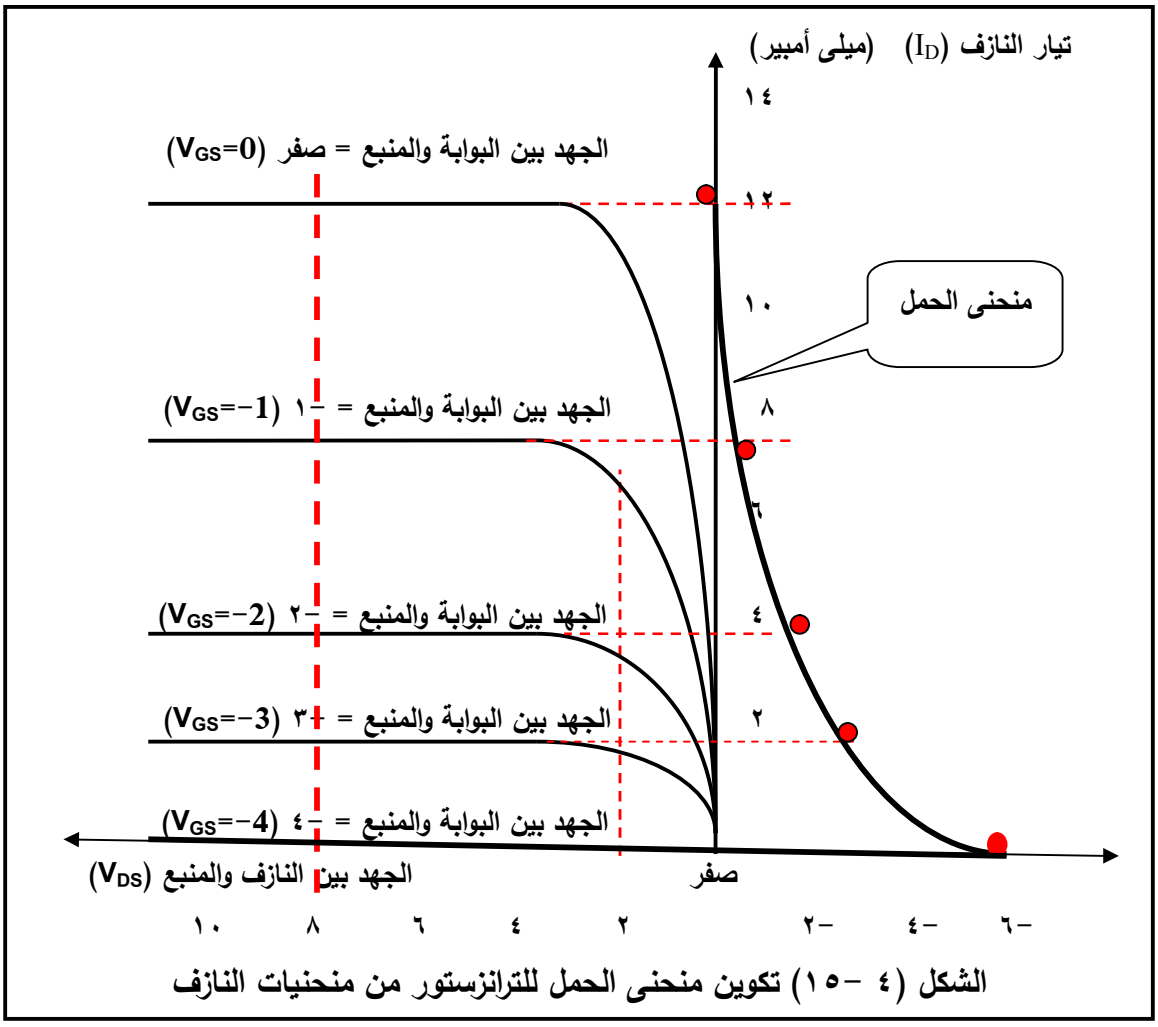
الشكل (٤ –١٤) خواص ظاهرة إنهيار القناة للترانزستور المتأثر بالمجال ذو القناة نوعية (ن)

٤-٣-١-١ خواص منحنيات تشغيل للترانزستور المتأثر بالمجال

يمكن الحصول على خواص منحنيات تشغيل للترانزستور المتأثر بالمجال بتوقيع نقاط تيار الخرج بالنسبة الى جهد الدخل لقيم ثابتة لجهد الخرج كما هو موضح بالشكل (٤-١٥) – ولتكوين مثل هذا المنحنى فمن الضرورى تحديد قيمة الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) – عند هذه القيمة يمتد خط رأسى ليتقاطع مع قيم الجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) – كل من هذه النقاط تحدد قيمة تيار النازف ٠ قيمة تيار التشبع (I_{DSS}) يعاد رسمها بالنسبة الى جهد الدخل (V_{GS}) وبالتالى يتكون قطع ناقص كما هو موضح بالشكل٠ مع ملاحظة قيم جهد الدخل (V_{GS}) التى يتم إختيارها فيجب أن تكون فى منطقة إيقاف إندفاع الجهد[٣] – القطع الناقص الناتج غير خطى الشكل مما يتسبب فى ظهور تشوية فى الخرج عند إستخدام الترانزستور كمكبر- مع التأكيد أن هناك طرق لتقليل نسبة التشويه٠ ويمكن الحصول على معادلة منحنى النقل فى منطقة إيقاف إندفاع الجهد على النحو التالى:

$$I_D = I_{DSS}\left[1-\frac{V_{GS}}{V_p}\right]^2$$ المعادلة (٤-١٩)

حيث تيار النازف يساوى تيار التشبع عند قيمة جهد بين البوابة والمنبع يساوى صفر وأن قيمة تيار النازف يساوى صفر عند قيمة جهد بين البوابة والمنبع يساوى قيمة إيقاف إندفاع الجهد ($V_{GS} = V_p$)٠ ومن أحد التطبيقات الهامة للترانزستور إمكانياته لإنتاج خرج غير خطى كدالة للدخل٠

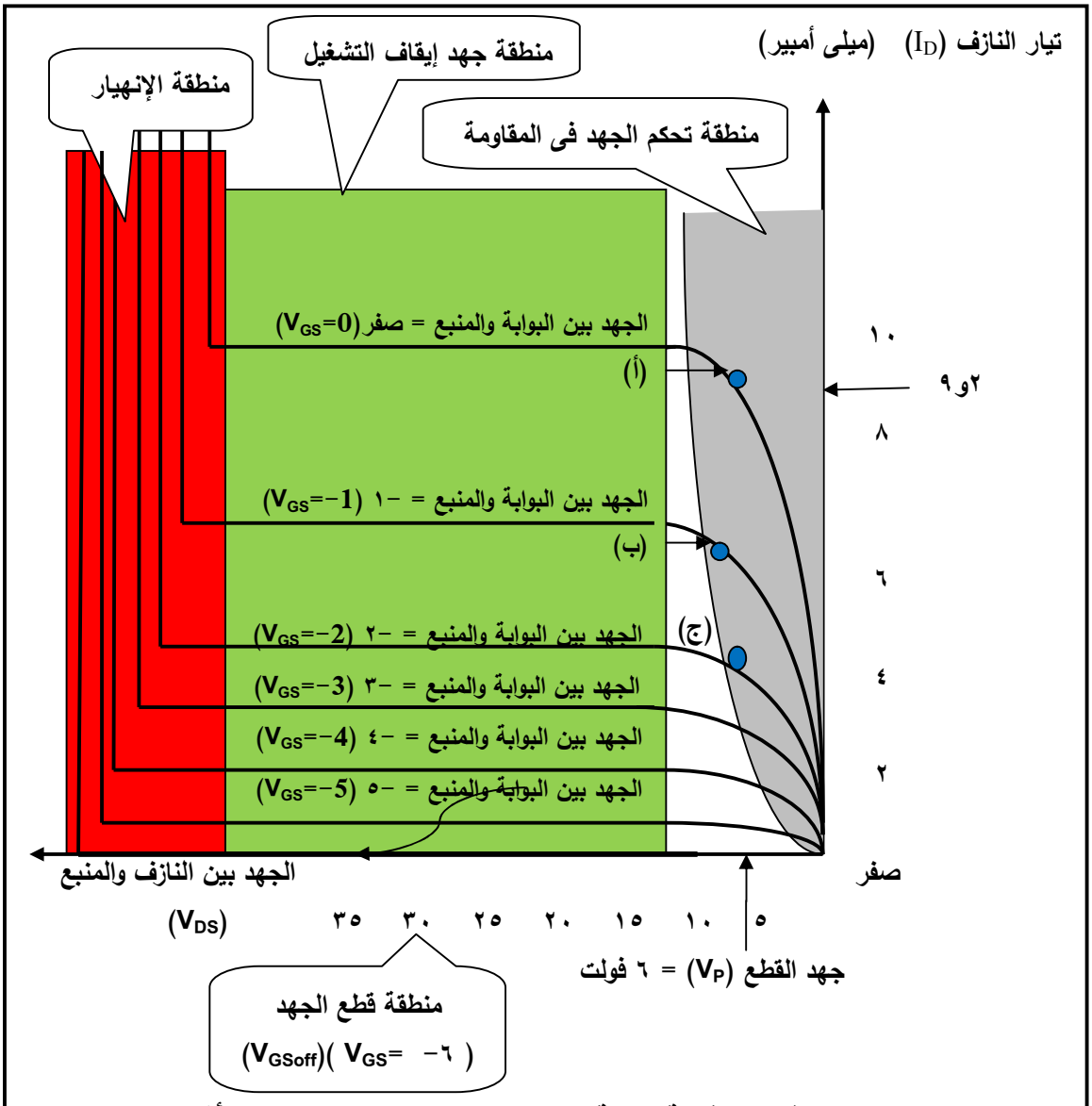


الشكل (٤ -١٥) تكوين منحنى الحمل للترانزستور من منحنيات النازف

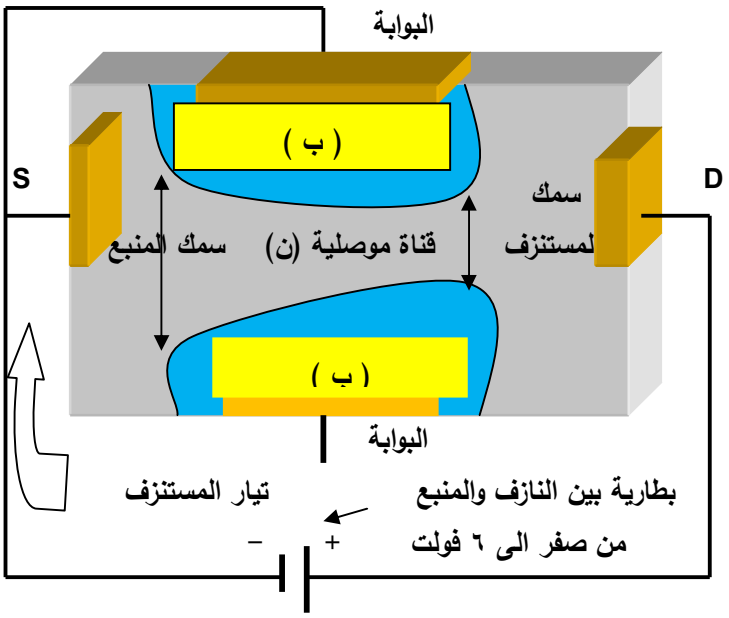
الجدول (٤-٢) القيم النموذجية لتغذية للترانزستور المتأثر بالمجال

يم الجهد بين البوابة والمنبع ($V_{GS}(V)$)	م الجهد بين النازف والمنبع عند بداية جهد القطع ($V_{DSP}(V)$)	يار جهد القطع (I_{DP}) (ma)عند جهد بين النازف والمنبع يساوى ١٥ فولت
صفر	٦ = V_P	٢و٩ = (I_{DSS})
-١	٥	٣و٦
-٢	٤	١و٤
-٣	٣	٢
-٤	٢	١

٥-	١	٣و٠
٦- = ($V_{GS(off)}$)	صفر	صفر



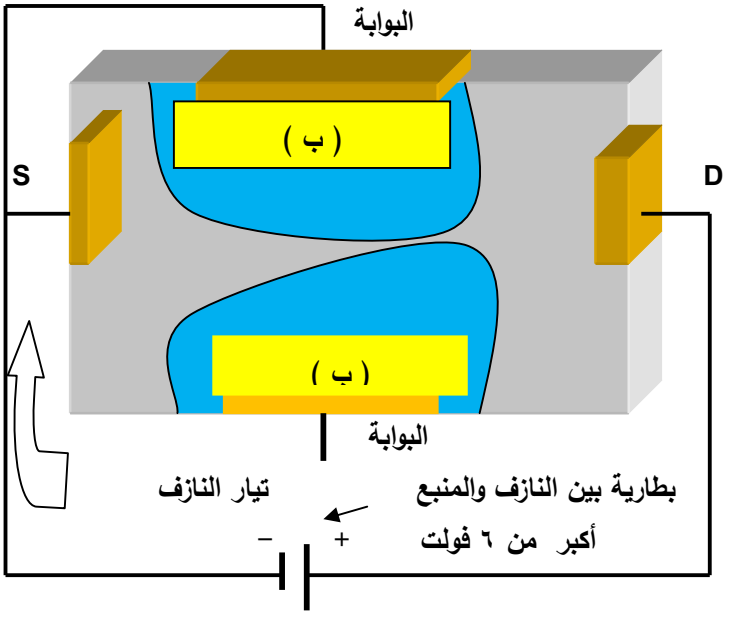
الشكل (٤ -١٦) قيم نموذجية لعائلة منحنيات النازف للترانزستور المتأثر بالمجال



منطقة الأوم

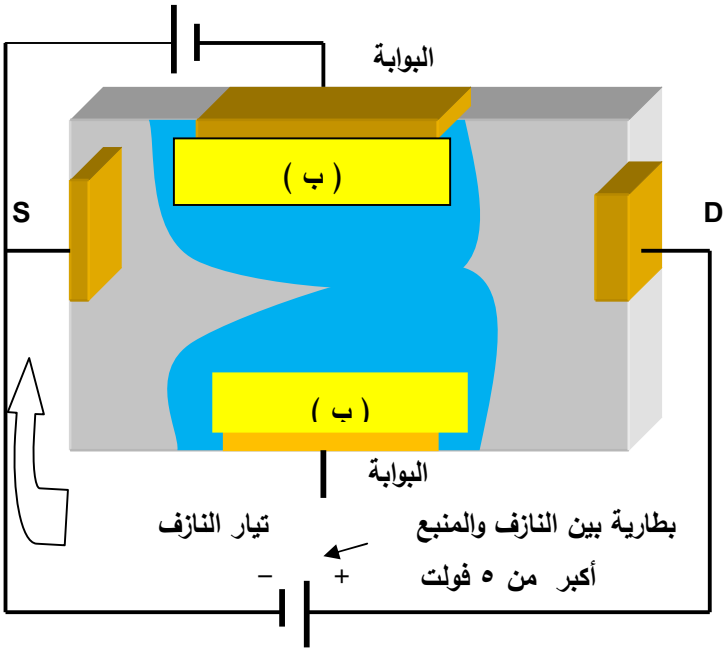
- تيار النازف يتناسب طرديا مع الجهد بين النازف والمنبع
- سمك القناة بالقرب من المنبع أكبر من سمك القناة بالقرب من النازف
- أطراف البوابة متصلين

الشكل (٤– ١٧ أ) عند جهد بين البوابة والمنبع = صفر



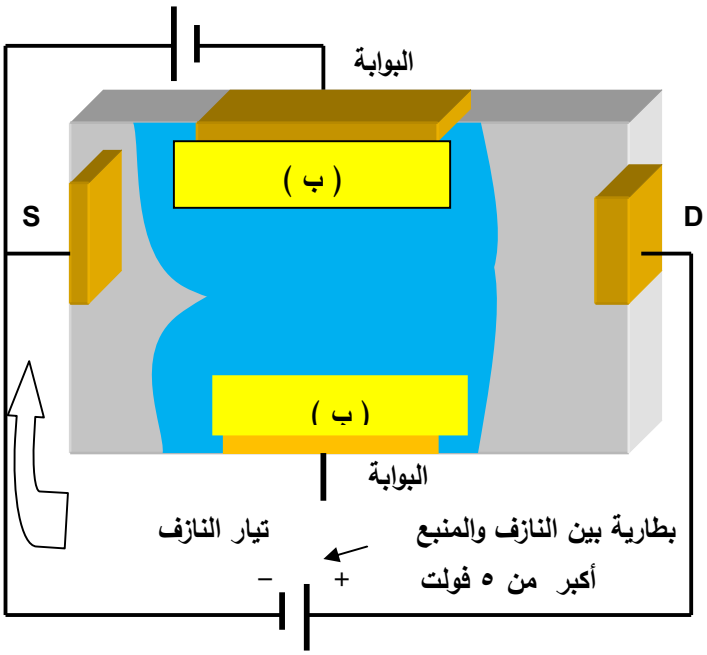
- منطقة قطع الجهد
الجهد البوابة والمنبع = صفر
- الجهد بين البوابة والنازف جهد عكسى أكبر من ٦ فولت
سمك القناة بالقرب من النازف تساوى صفر
- تيار النازف يساوى ٢و٩ ميلى لا يعتمد على الجهد بين النازف والمنبع

الشكل (٤– ١٧ ب) عند جهد بين البوابة والمنبع = صفر



- منطقة قطع الجهد
الجهد البوابة والمنبع = –١
- الجهد بين البوابة والنازف
جهد عكسى أكبر من ٦
فولت
- سمك القناة بالقرب من
النازف تساوى صفر
- تيار النازف يساوى ٣و٦
ميلى لا يعتمد على الجهد
بين النازف والمنبع

الشكل (٤– ١٧ ج) عند جهد بين البوابة والمنبع = – ١ فولت



- منطقة قطع الجهد
- $|V_{GS}| \geq |V_{GS(off)}|$
- تيار النازف يساوى صفر
ميلى لا يعتمد على الجهد
بين النازف والمنبع حتى
جهد الإنهيار العكسى

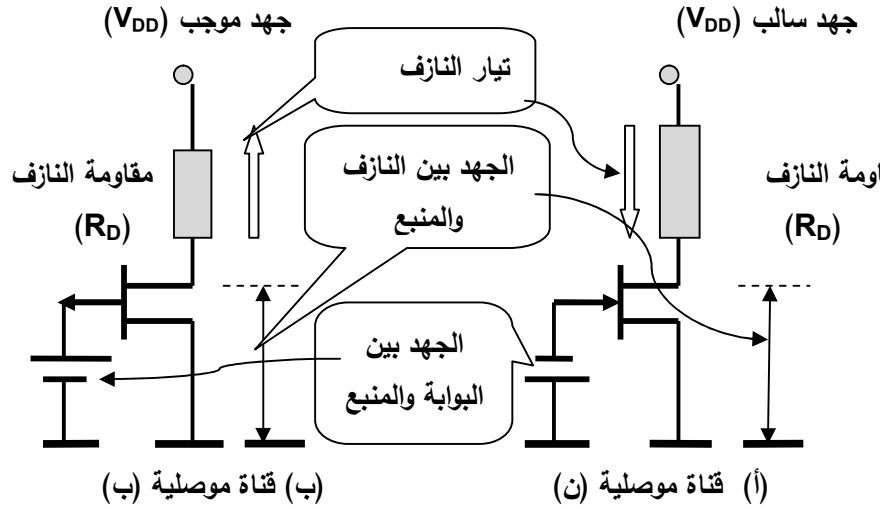
الشكل (٤– ١٧ د) عند جهد بين البوابة والمنبع = – ٦ فولت

٤ – ٣ – ١ – ٢ تغذية الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة

يتم تغذية الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة من خلال بطارية بغرض إنشاء جهد خرج للتيار المستمر كمستوى نسبى لتحديد التغيرات الناشئة نتيجة لإشارات التيار المتردد عند إستخدامة كمكبر٠ عند توصيل دائرة الترانزستور بتكوين المنبع المشترك – فإن جهد الدخل هو الجهد بين البوابة والمنبع وجهد الخرج بين النازف والمنبع ٠ هناك طريقتين لإنشاء المستوى النسبى لجهد التيار المستمر – وهما آلية التغذية الثابتة وآلية التغذية الذاتية٠

- **آلية التغذية الثابتة للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة**

فى الشكل (٤ – ١٨) مصدرين لتغذية الترانسستور بالتيار المستمر ويشار لهما (V_{DD}) لتغذية النازف من خلال مقاومة النازف (R_D) والمصدر الآخر لتحديد قيمة الجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS})٠



الشكل (٤ – ١٨) آلية التغذية الثابتة للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة بنوعى مادة القناة (ن) و (ب)

بموجب قانون الجهد لكيرشيف – نجد :

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$ **(قناة موصلية ن)**

المعادلة (٤-٢٠)

$$V_{DS} = -V_{DD} - I_D R_D$$ **(قناة موصلية ب)**

ويمكن إعادة كتابتها على النحو التالى:

$$I_D = -\frac{V_{DS}}{R_D} + \frac{V_{DD}}{R_D}$$ **(قناة موصلية ن)**

المعادلة (٤-٢١)

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_D} + \frac{V_{DD}}{R_D}$$ **(قناة موصلية ب)**

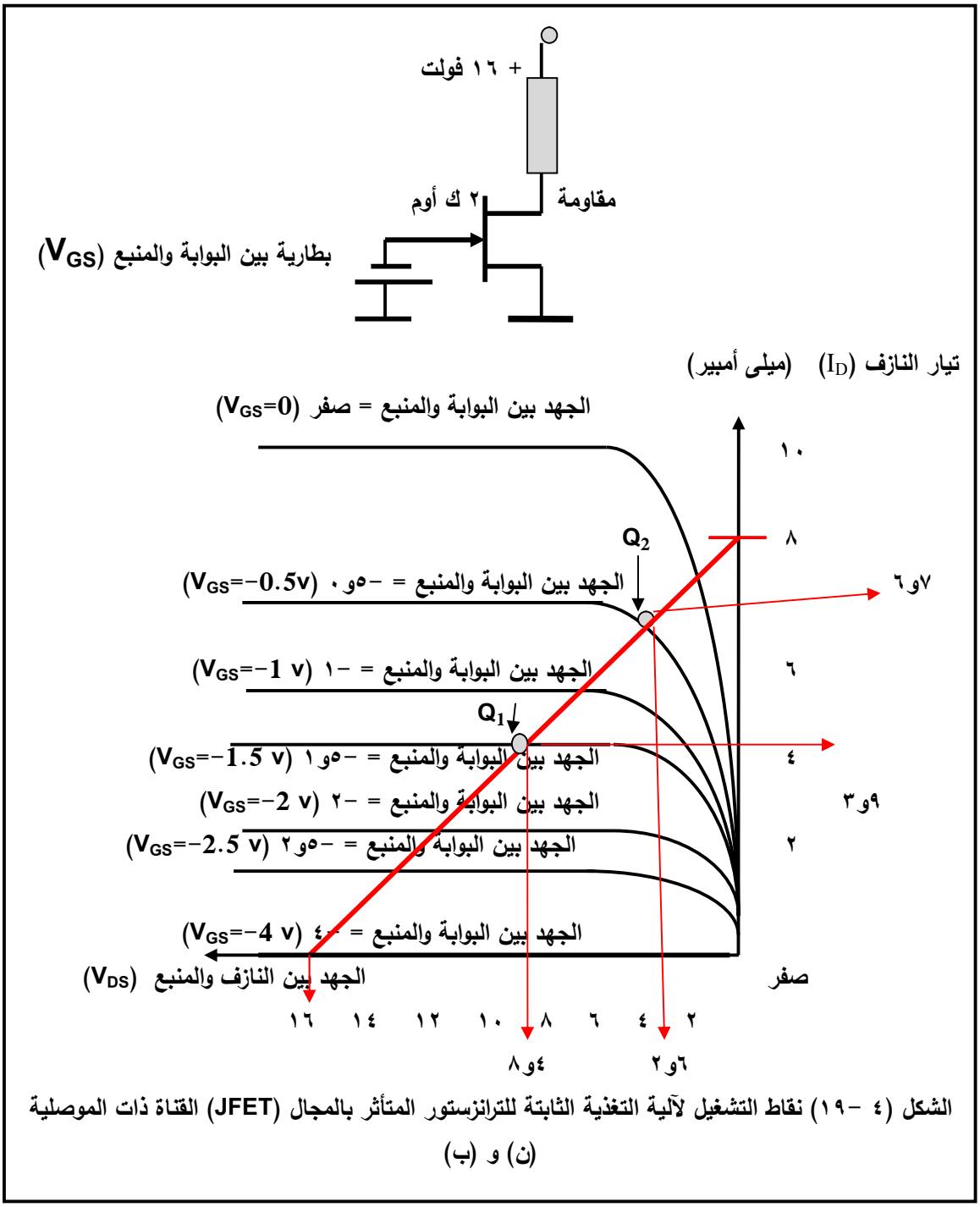
عند إستخدام هذه المعادلات – يتم التعويض دائما بإشارة الموجب للبطارية (V_{DD}) للتأكيد أنه يتم الحصول على الإشارة الصحيحة لجهد النازف والمنبع ٠ ويجب أن تكون قيمة موجبة للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة ذو قناة (ن) كما يجب أن يكون قيمة سالبة للترانزستور ذو القناة (ب)٠ على سبيل المثال فى الترانزستور ذات قناة (ن) يكون الجهد (V_{DD}) يساوى + ١٥ فولت من النازف الى الأرض٠ إذا كانت قيمة تيار النازف تساوى ١٠ ميلى أمبير ومقاومة النازف (R_D) تساوى ١ كيلو أوم – نحصل على جهد النازف والمنبع (V_{DS}) = ١٥ – (١٠ ميلى أمبير) x (١ ك أوم) = -٥ فولت وبالتالى يعاد كتابة المعادلة (٤-٢١) كالتالى:

$$I_D = -\left(\frac{1}{R_D}\right) V_{DS} + \frac{V_{DD}}{R_D}$$ **(قناة موصلية ن)**

$$I_D = \left(\frac{1}{R_D}\right) V_{DS} + \frac{V_{DD}}{R_D}$$ **المعادلة (٤-٢٢)**

المعادلات السابقة تمثل خط الحمل لكل من القناة (ن) أو (ب) للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة ويمكن تحديد كل نقطة على مجموعة منحنيات خواص النازف لتحديد

نقطة تشغيل الترانزستور (Q)٠ يتقاطع خط الحمل مع محور الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) عند جهد البطارية (V_{DD}) ومحور تيار النازف عند جهد البطارية مقسوم على مقاومة النازف (V_{DD}/R_D)٠ لمزيد من الإيضاح لمعرفة تأثير تغير جهد تغذية الدخل (V_{GS}) – على سبيل المثال (من –٥و١ فولت الى + ٥و٠ فولت) على كل من تيار الخرج (I_D) وجهد الخرج (V_{DS}) – نحاول تحليل الدائرة الكهربية بالشكل (٤ – ١٩) ٠ بتطبيق المعادلة (٤ – ٢١) لإنشاء خط الحمل يرسم خط بين قيمتى الجهد بين النازف والمنبع والذى يساوى جهد البطارية ١٦ فولت ($V_{DS} = V_{DD} =+1 6 V$) وتيار النازف يساوى ٨ ميلى أمبير ($I_D= V_{DD}/R_D$) ليتقاطع مع منحنى الجهد بين البوابة والمنبع ويساوى – ٥و١ فولت ($V_{GS} =-1.5 V$) عند نقطة التشغيل (Q_1)٠ عند تيار النازف يساوى ٩و٣ ميلى أمبير ($I_D=3.9 ma$) والجهد بين النازف والمنبع ويساوى ٤و٨ فولت ($V_{DS} = 8.4 V$)٠إذا تغيرت قيمة الجهد بين البوابة والمنبع لتساوى – ٥و٠ فولت ($V_{GS} =- 0.5 V$) نحصل على نقطة التشغيل (Q_2) عند تيار النازف يساوى ٧و٦ ميلى أمبير والجهد بين النازف والمنبع ويساوى ٦و٢ فولت ٠ فى المثال السابق فإن التغير فى قيمة الجهد بين البوابة والمنبع يسبب تغير فى نقطة التشغيل (Q)٠ يوضح هذا المثال نتيجة هامة٠ مع ملاحظة تغير قيمة الجهد بين البوابة والمنبع من – ٥و٠ فولت فى دائرة التغذية يسبب تحريك نقطة التشغيل (Q) خارج منطقة إيقاف جهد الإندفاع الى منطقة التحكم فى المقاومة ٠ كما سبق أن ذكرنا أن نقطة التشغيل (Q) يجب أن تقع فى منطقة إيقاف جهد الإندفاع فى آلية التشغيل كمكبر عادى٠ لتأكيد ذلك فإن نقطة التشغيل (Q) تقع فى منطقة إيقاف جهد الإندفاع فإن قيمة الجهد بين النازف والمنبع يجب أن تكون أكبر من الفرق بين جهد القطع (V_p) والجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) ($V_p — V_{GS}$) ٠



الشكل (٤ -١٩) نقاط التشغيل لآلية التغذية الثابتة للترانزستور المتأثر بالمجال (JFET) القناة ذات الموصلية (ن) و (ب)

إيقاف جهد الإندفاع للترانزستور الموضح خواصها بمنحنيات النازف ذات العلاقة بالمثال أعلاه. فيمكن ملاحظة أن قيمة إيقاف جهد الإندفاع يساوى -٤ فولت. حيث أنه الجهد

بين البوابة والمنبع (V_{GS}) يساوى ٥و٠ فولت وقيمة الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) يساوى – ٦و٢ فولت فقط عند نقطة التشغيل (Q_2) فإننا لم نحقق المتطلبات بأن يكون الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) أكبر من قيمة إيقاف جهد الإندفاع (V_p) مطروحا منه قيمة الجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) ($V_{DS} > V_P - V_{GS}$)٠ نقطة التشغيل (Q_2) تقع فى منطقة المقاومة المتغيرة٠ يمكن تحديد قيمة تيار النازف بإستخدام خواص حمل النقل للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة ٠ وحيث أن حمل النقل يتعين برسم محور تيار النازف والمحور الجهد بين البوابة والمنبع وإستخراج قيمة تيار النازف المقابلة مباشرة يمكن تحديد قيمة الجهد بين النازف والمنبع جبريا٠ بينما آلية إستخدام المنحنيات لتوقيع نقاط التغذية مفيدة وتقدم أفكاراً للطريقة التي تؤثر بها متغيرات الدائرة على بعضها البعض٠ يمكن حساب قيم تيار النازف وقيمة الجهد بين النازف والمنبع بإستخدام عملية حسابية بسيطة فى حالة معرفة قيم إيقاف جهد الإندفاع (V_p) وتيار التشبع (I_{DSS})٠ يوضح المثال التالى إستخدام قانون التربيع في هذه العملية الحسابية٠ وللتأكيد أن الحل بالرسم البيانى يتوافق مع الحل الجبرى يجب حساب تيار الخرج (I_D) وجهد الخرج (V_{DS}) للترانزستور فى الشكل (٤ – ١٩) حيث قيمة تيار التشبع (I_{DSS}) يساوى ١٠ ميلى أمبير وقيمة إيقاف جهد الإندفاع (V_p) يساوى – ٤ فولت عند جهد الدخل (V_{GS}) يساوى ٥و١ فولت – ولتحديد قيمة تيار النازف كالتالى:

$$I_D = I_{DSS}\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right]^2$$

$$I_D = 10mA\left[1 - \frac{-1.5V}{-4V}\right]^2 = 3.9mA$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 16 - 3.9 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^3 = 8.2\ V$$

تتطابق هذه النتائج بالتى تم الحصول عليها بيانيا – وعلى هذا كان من الضرورى لنفترض أن الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة تم تغذيتة فى منطقة إيقاف جهد الإندفاع لتبرير إستخدام المعادلة (٤-١٩) لإيجاد قيمة تيار النازف إذا كانت الحسابات قد أنتجت قيمة الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) أقل من قيمة الفرق بين قيمة إيقاف جهد الإندفاع (V_p) والجهد بين البوابة والمنبع ($V_p — V_{GS}$) ويساوى ٥و٢ فولت٠ يمكن تلخيص هذا أن الترانزستور لم تتم تغذيته فى منطقة إيقاف جهد الإندفاع ولذلك هناك ضرورة لإيجاد آلية أخرى لإيجاد معاملات نقطة التشغيل (Q)٠ يحتمل أن تختلف قيم كل من تيار التشبع (I_{DSS}) وإيقاف جهد الإندفاع (V_p) على نطاق واسع فى الترانزستور المتأثر بالمجال والوصلة من نوع الى آخر بنسبة تصل الى ٥٠% وهذا غير عادى٠ عندما تستخدم دائرة التغذية الثابتة لتوقيع نقطة التشغيل (Q) يحدث تغيير فى قيم المعاملات للترانزستور فى الدائرة التى تم تصميمها وتقودنا الى خواص ترانزستور آخر ٠ وبالفرض على سبيل المثال أن معاملات الترانزستور المستخدم على النحو التالى تيار التشبع (I_{DSS}) يساوى ١٣ ميلى أمبير وقيمة إيقاف جهد الإندفاع (V_p) يساوى ٣و٤ فولت فى تغذية الدائرة فى الشكل (٤ – ١٩ أ) عند جهد الدخل (V_{GS}) يساوى ٥و١ فولت٠

نحصل على :

$$I_D = (10ma)\left[1 - \frac{-1.5}{-4.3}\right]^2 = 5.5ma$$

$$V_{DS} = 16 - (5.51\ ma)(2\ K\Omega) = 4.98\ V$$

توضح هذه النتائج أن تيار النازف يزيد بنسبة ٣و٤١% عن قيمته للدائرة بالشكل (٤ -١٩) وأن قيمة الجهد بين النازف والمنبع تتناقص بنسبة ٧و٦٨ % ٠ مع ملاحظة

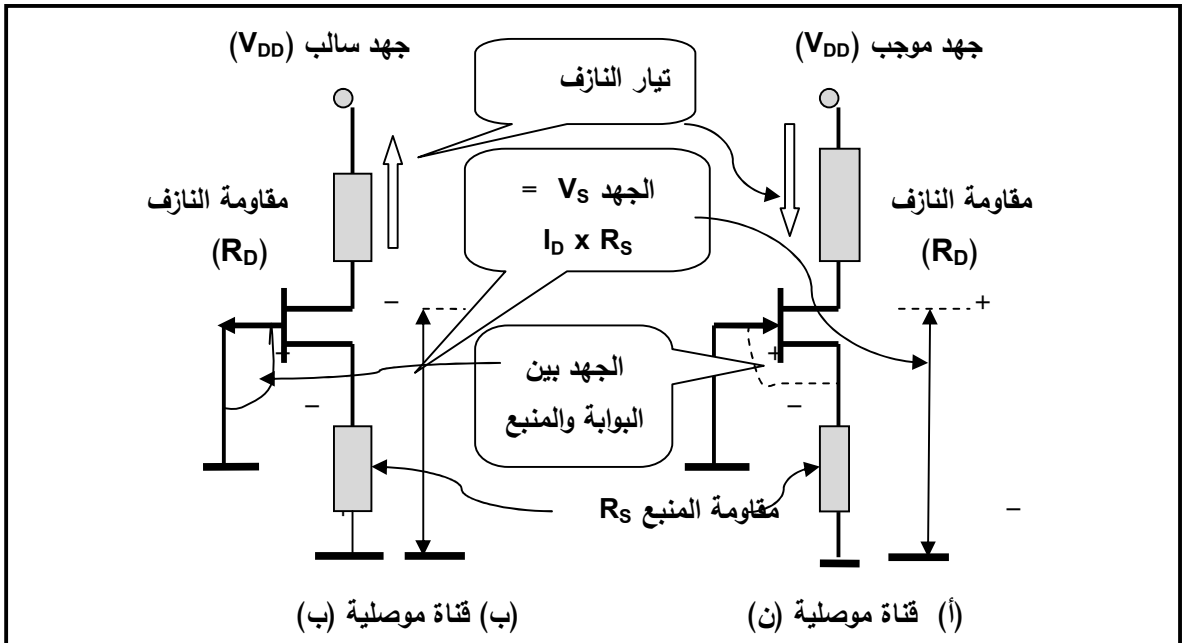
أن قيمة الجهد بين النازف والمنبع هى ٨٩و٤ فولت وبالتالى فهى قريبة الى منطقة إيقاف جهد الإندفاع (٣و٤ فولت) ٠ نستخلص من ذلك أن دوائر التغذية الثابتة لا تحقق إستقرار نقطة تشغيل (Q) جيدة بالنسبة للتغيرات فى معاملات الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة٠

الجدول ٤-٣ مقارنة بين قيم المعاملات

جهد الدخل (V_{GS}) فولت	ر التشبع (I_{DSS}) ميلى أمبير	جهد القطع (V_p) فولت	تيار النازف (I_D) ميلى أمبير	الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS})	نسبة التغير فى تيار النازف (I_D) %	نسبة التغير فى الجهد بين النازف والمنبع (V_{DS}) %
-٥و١	١٠	-٤	٩و٣	٢و٨		
-٥و١	١٣	-٣و٤	٥١و٥	٩٨و٤	٣و٤١	٧و٦٨
-٥و١	١٤	-٤و٤	٠٩و٦	٨و٣	٥٦	١١٥
-٥و١	١٥	-٥و٤	٧٣و٦	٥٣و٢	٧٢	٢٢٥

- **آلية التغذية الذاتية للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة**

يوضح الشكل (٤- ٢٠) دائرة تغذية التى توفر تحسين الإستقرار وتتطلب مصدر جهد واحد فقط ٠



الشكل (٤ – ٢٠) آلية التغذية الذاتية للترانزستور المتأثر بالمجال بنوعى مادة القناة (ن) و (ب)

تسمى هذه الآلية التغذية الذاتية بسبب الجهد الواقع على مقاومة المنبع نتيجة سريان تيار يحدد قيمة الجهد بين البوابة والمنبع (V_{GS}) ٠ يمكن أن نتفهم هذه الحقيقة حيث الجهد ($V_S = I_D R_S$) على طرف المنبع بالنسبة الى الأرض٠ للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة ذات القناة (ن) وهذا يعنى أن طرف المنبع موجب بالنسبة الى طرف البوابة بمعنى أن فولتية البوابة سالبة بقيمة ($V_S = I_D R_S$) بإدراك أن تيار النازف المار فى المقاومة (R_S) ينتج الجهد المطلوب للمنبع كما هو مرغوب للقناة (ن) للترانزستور ($V_{GS} = -I_D R_S$) – بالنسبة الى الترانزستور قناة (ب) فإن طرف البوابة ذات فولتية موجبة ($I_D R_S$) بالنسبة الى المنبع ($V_{GS} = I_D R_S$)٠

$$V_{GS} = -I_D R_{|S}$$ **(للقناة ذات الموصلية (ن))**

المعادلة (٤-٢٣)

$$V_{GS} = I_D R_S$$ **(للقناة ذات الموصلية (ب))**

تصف هذه المعادلات خطوط مستقيمة عند توقيعها على المحورين الجهد بين البوابة والمنبع بالنسبة الى تيار النازف (V_{GS}-I_D) ٠ للتحقق من هذه المعادلات بكتابة قانون الجهد لكيرشيف حول كل من البوابة للمنبع٠ يسمى كل خط مستقيم بخط التغذية وتستخرج قيم تيار النازف فى دائرة التغذية الذاتية بيانيا برسم خط التغذية على نفس مجموعة المحاور بإستخدام خواص دالة النقل٠ تقاطع المنحنيين يحدد نقطة التشغيل (Q)٠ بكتابة قانون الجهد لكيرشيف حول دائرة الخرج فى الشكل (٤-٢٠) – نحصل على :

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D\left(R_D + R_s\right)$$ **(للقناة ذات الموصلية (ن))**

المعادلة (٤-٢٤)

$$V_{DS} = -V_{DD} - I_D\left(R_D + R_s\right)$$ **(للقناة ذات الموصلية (ب))**

يوضح المثال التالى خطوات الحل البيانى – يوضح الشكل (٤-٢٠) الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة وخواص النقل لحساب القيم النموذجية لتيار النازف وقيمة

الجهد بين النازف والمنبع بيانيا ٠ حيث أن مقاومة المنبع (R_S) تساوى ٦٠٠ أوم – فإن معادلة خط التغذية كالتالى:

$$V_{GS} = - I_D R_S = - 600 I_D$$

من الواضح أن خط التغذية يمر بإستمرار خلال نقطة الأصل (تيار النازف يساوى صفر والجهد بين البوابة والمنبع يساوى صفر) وبالتالى فإن النقطة (صفر وصفر) هى إحدى النقاط على خط التغذية٠ ولتحديد النقاط الأخرى يتم إختيار قيمة الجهد بين البوابة والمنبع ويتم حل المعادلة بالنسبة الى تيار النازف – وبفرض أن قيمة الجهد بين البوابة والمنبع يساوى –٣ فولت وبالتالى : فإن تيار النازف يساوى قيمة الجهد بين البوابة والمنبع مقسوما على مقاومة المنبع = – (–٣) / ٦٠٠ = ٥ ميلى أمبير٠

وبالتالى تمثل القيم (– ٣ فولت و٥ ميلى أمبير) نقطة أخرى على خط التغذية ٠ يمكن رسم خط مستقيم بين النقطتين (صفر وصفر) و(– ٣ فولت و٥ ميلى أمبير) وملاحظة أين يتقاطع هذا الخط٠ يلاحظ أن خط التغذية يتقاطع مع خواص المنحنيات عند قيم (تيار النازف يساوى ٣ ميلى أمبير عند قيمة الجهد بين البوابة والمنبع يساوى –٨و١ فولت) وقد وجد أن قيمة الجهد بين النازف والمنبع كالتالى:

$$V_{DS}=V_{DD}-I_D (R_S + R_D)=15-3\ x10^{-3}\ (600 + 1500) =8.7\ V$$

يمكن أيضا حساب قيم تيار النازف والجهد بين البوابة والمنبع فى دوائر التغذية الذاتية جبريا بحل معادلة خط التغذية ومعادلة قانون التربيع٠ لتنفيذ العملية الحسابية يجب معرفة قيم تيار التشبع (I_{DSS}) وقيم إيقاف جهد الإندفاع (V_p)٠ كما فى آلية التغذية الثابتة فإن النتائج صالحة فقط إذا كانت نقطة التشغيل (Q) تقع فى منطقة إيقاف جهد الإندفاع بمعنى أن تكون قيمة الجهد بين النازف والمنبع أكبر من الفرق بين قيمة إيقاف جهد الإندفاع وقيمة الجهد بين البوابة والمنبع ($V_{DS} > Vp – V_{GS}$) ٠ ولذلك يجب أن نفترض أن ذلك هو الحال، ولكن مع تجاهل النتائج إذا أوضحت النتائج أن قيمة الجهد بين النازف والمنبع أقل من الفرق بين قيمة إيقاف جهد الإندفاع وقيمة الجهد بين البوابة والمنبع ($V_{DS} > Vp – V_{GS}$) ٠ يوضح الشكل (٤ – ٢١)

خواص منحنى النقل للقناة (ن) للترانزستور بقيم تيار التشبع يساوى ١٠ ميلى أمبير قيمة إيقاف جهد الإندفاع تساوى – ٤ فولت وبالتالى فإن معادلة قانون التربيع تصبح:

$$I_D = 10 \times 10^{-3} (1 - V_{GS} / 4)^2$$

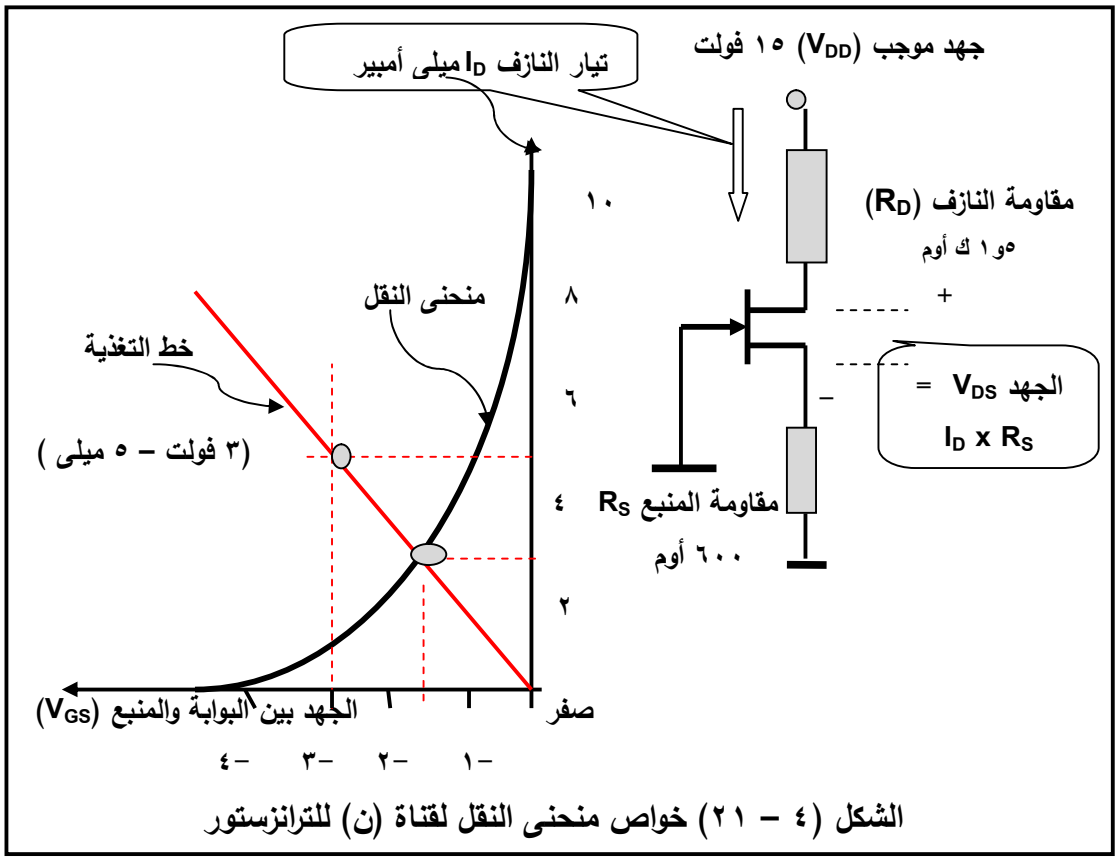
مع ملاحظة أن كلا من الجهد بين البوابة والمنبع وقيمة إيقاف جهد الإندفاع سالب القيمة – وبالتالى يعاد كتابة المعادلة أعلاه على الشكل الصحيح وتصبح معادلة خط التغذية كالتالى :

$$V_{GS} = -I_D R_S = -600\ I_D$$

بالتعويض فى قيم الجهد بين البوابة والمنبع وتساوى – ٦٠٠ مضروب فى تيار النازف فى معادلة قانون التربيع – نحصل على :

$$I_D = 10^{-2} [1 - 600\ I_D/4]^2 = 10^{-2}[1 - 150\ I_D)^2$$

$$= 10^{-2} [1 - 300\ I_D + 2.25 \times 10^4\ I_D^2] = 10^{-2} - 3\ I_D + 225\ I^2_D$$



الشكل (٤ – ٢١) خواص منحنى النقل لقناة (ن) للترانزستور

وبترتيب المعادلة

$$225\ I^2_D - 4I_D + 0.01 = 0$$

بإستخدام الصيغة التربيعية لحل المعادلة أعلاه :

$$ID = \frac{-b \pm \sqrt{b-4ac}}{2a} = \frac{-4 \pm \sqrt{16-4x225x0.01}}{2x225}$$

نحصل على قيمتين لتيار النازف هما ٧٧و١٤ ميلى أمبير أو ٣ ميلى أمبير – من الواضح أن قيمة تيار النازف تساوى إحدى القيمتين – قيمة تيار النازف تساوى ٧٧و١٤ ميلى أمبير ليست مناسبة حيث أن هذه القيمة تتعدى قيمة تيار التشبع والذى يساوى ١٠ ميلى أمبير – وبالتالى فإن قيمة تيار النازف والتى تساوى ٣ ميلى أمبير تتطابق مع الحل البيانى السابق والمستخرج قيمته ٣ ميلى أمبير٠ ويصبح خط التغذية لقيمة الجهد بين البوابة والمنبع يساوى –٦٠٠ x ٣ ميلى أمبير= ٨و١ فولت والتى تتطابق أيضا مع نتائج الحل البيانى وتصبح قيمة الجهد بين النازف والمنبع

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

تساوى ١٥ – ٣ x ١٠$^{-٣}$ (٦٠٠ + ١٥٠٠) = ٧و٨ فولت

وهى أكبر من الفرق بين قيمةإيقاف جهد الإندفاع والجهد بين البوابة والمنبع ($|V_P| - |V_{GS}|$) وتساوى ٤ – ٨و١ = ٢و٢ فولت٠ لإثبات أن آلية التحيز الذاتي توفر الإستقرار أفضل بالمقارنة مع آلية التحيز الثابت٠ وبمقارنة إنحراف التغير الذى يحدث فى تيار النازف بإستخدام كلا من الآليتين عندما تتغير معاملات الترانزستور ليصبح تيار التشبع يساوى ١٢ ميلى أمبير وقيمة إيقاف جهد الإندفاع يساوى – ٥و٤ فولت ٠ وقد إفترضنا فى كل حالة أن نقطة التغذية الأولية تشير الى (إستخدام الترانزستور تيار تشبع يساوى ١٠ ميلى أمبير وقيمة إيقاف جهد الإندفاع يساوى –٤ فولت ٠ يتم تعيين تيار النازف = ٣ ميلى أمبير وبالتالى فإن الترانزستور له معاملات جديدة ويجب إستبدالها في الدائرة ٠ وسبق ملاحظة أن تيار النازف = ٣ ميلى أمبير عندما كانت قيمة الجهد بين البوابة والمنبع يساوى ٨و١ فولت وبالتالى نفترض أنه فى دائرة التحيز الثابت أن

قيمة الجهد بين البوابة والمنبع يساوى – ٨و١ فولت عند تيار تشبع يساوى ١٢ ميلى أمبير وقيمة إيقاف جهد الإندفاع يساوى – ٥و٤ فولت مع قيمة الجهد بين البوابة والمنبع يساوى – ٨و١ فولت – نجد أن القيمة الجديدة لتيار النازف فى دائرة التحيز الثابت تساوى :

$$I_D = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12x10^{-3}\left(1-\frac{1.8}{4.5}\right)^2$$

هذا التغير فى قيمة تيار النازف من ٣ الى ٣٢و٤ ميلى أمبير يمثل زيادة ٤٤% ٠ وبفرض أن معاملات الترانزستور فى ألية التحيز الذاتى قد تغيرت بنفس القدر (تيار التشبع يساوى ١٢ ميلى أمبير وقيمة إيقاف جهد الإندفاع يساوى – ٥و٤ فولت) – عندئذ فإن صيغة قانون التربيع

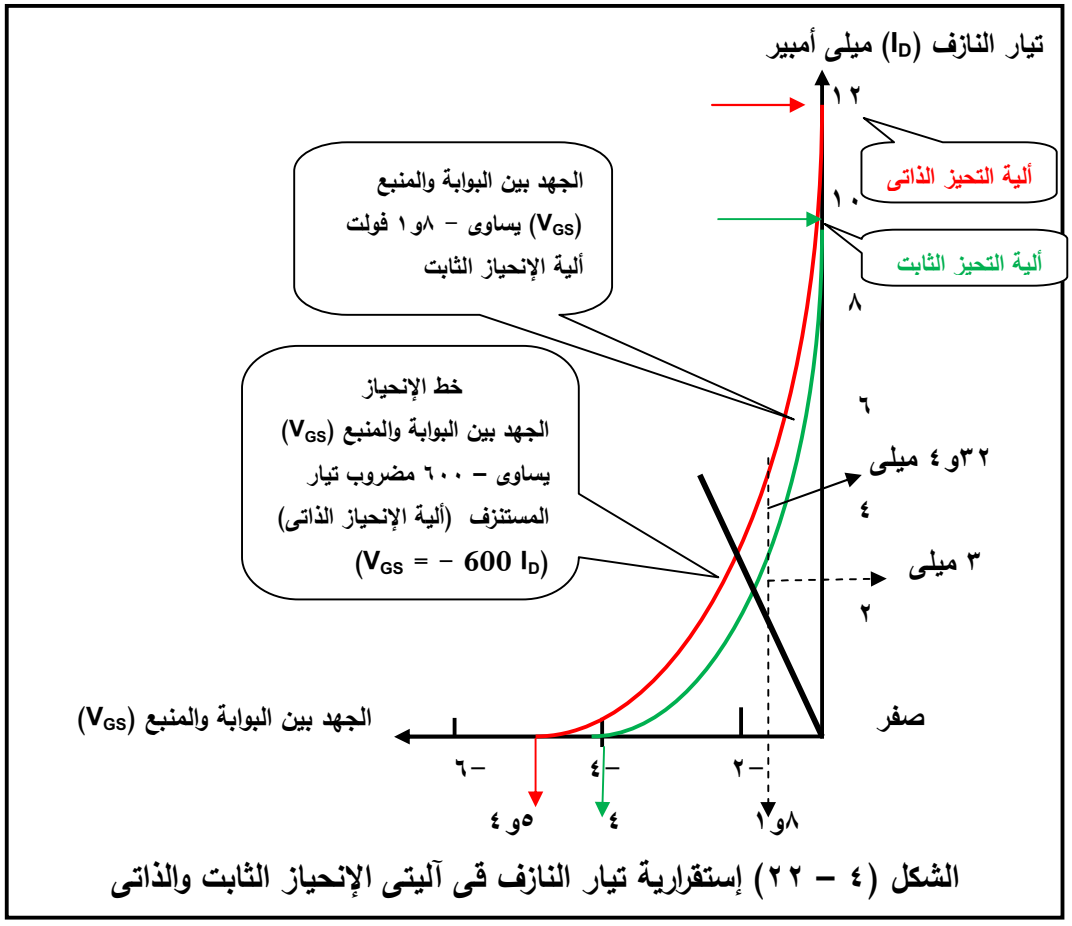
$$I_D = 12 \times 10^{-3} (1 - V_{GS} / 4.5)^2$$

بينما تبقى معادلة خط الإنحياز كما هى بدون تغيير

$$V_{GS} = - 600\ I_D$$

يقودنا حل المعادلات الى قيمة تيار النازف ٤٦و٣ ميلى أمبير والتى تمثل زيادة ٣و١٥% أقل من نصف القيمة فى حالة آلية الإنحياز الثابت٠ يوضح الشكل (٤ –٢٢) خواص منحنيات التقل للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة بالقيم لتيار التشبع يساوى ١٠ ميلى أمبير وإيقاف جهد الإندفاع يساوى –٤ فولت بالمقارنة مع منحنيات التقل للترانزستور بالقيم تيار التشبع يساوى ١٢ ميلى أمبير وإيقاف جهد الإندفاع يساوى – ٥و٤ فولت – ونلاحظ تقاطع خط الإنحياز الذاتى ($V_{GS} = - 600\ I_D$) مع كل من خواص الآليتين٠ مع ملاحظة أنها تتقاطع مع خواص منحنيات الترانزستور عند قيمة تيار النازف السابق حسابة لآلية الإنحياز الذاتى وهى (٣ و ٤٦و٣ ميلى أمبير) وأيضا تتضح قيمة الجهد بين البوابة والمنبع يساوى –٨و١ فولت بمعنى أن الخط يمثل آلية الإنحياز الثابت٠ يتقاطع هذا الخط مع المنحنيات فى نقطتين السابق حسابهما لآلية

الإنحياز الذاتى (٣ و ٣٢و٤ ميلى)٠ من الواضح فى هذا الشكل السبب فى أن آلية الإنحياز الذاتى تنتج تغير أقل فى قيمة تيار النازف بالمقارنة بآلية الإنحياز الثابت متى نتج تغير فى معاملات الترلنزستور فى منحنيات خواص مختلفة وأقلها فى ميل خط الإنحياز الذى يعطى أقل تغير فى قيمة تيار النازف ٠ يوضح الشكل (٤-٢٢) أن قيم التغذية جيدة يمكن أن يتحقق الإستقرار ضد التغييرات في معاملات الترانزستور بجعل ميل خط الإنحياز صغير بقدر الإمكان، يصبح ميل الخط المائل أصغر كلما كانت مقاومة المنبع (R_S) أكبر، ولكن بزيادة قيمة مقاومة المنبع (R_S) تتناقص قيمة تيار النازف٠

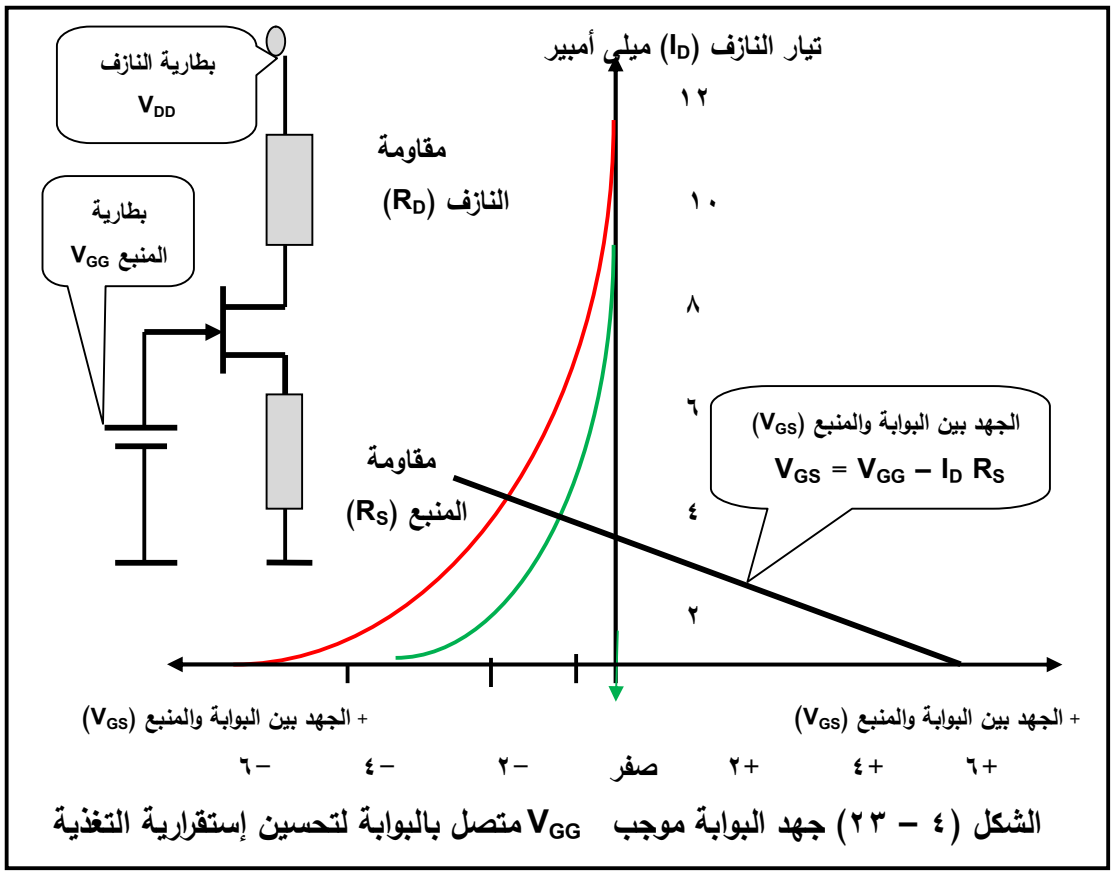


الشكل (٤ - ٢٢) إستقرارية تيار النازف فى آليتى الإنحياز الثابت والذاتى

أحد الطرق للحصول على خط الإنحياز ذات ميل صغير (قيمة مقاومة المنبع R_S كبيرة) ولا تزال تحتفظ بقيمة معقولة لتيار النازف وذلك بتوصيل بطارية الدخل (V_{GG}) ذات الفولتية موجبة الى طرف البوابة ذات الموصلية (ن) فى دوائر الإنحياز الذاتي ٠

الجدول ٤-٤ مقارنة بين آلتى الإنحياز الثابت والذاتى

المعاملات	القيم النموذجية			ة الإنحياز الثابت	ة الإنحياز الذاتى
	هد بين البوابة والمنبع (V_{GS})	ر التشبع (I_{DSS})	جهد القطع (V_p)	يار النازف (I_D)	يار النازف(I_D)
القيم النموذجية الأولية	-٨و١	١٠	-٤	٣	٣
قيم التغير	-٨و١	١٢	٥٠و٤	٣٢و٤	٤٦و٤
النسبة المئوية %		٢٠	٥و١٢	٤٤	٣و١٥

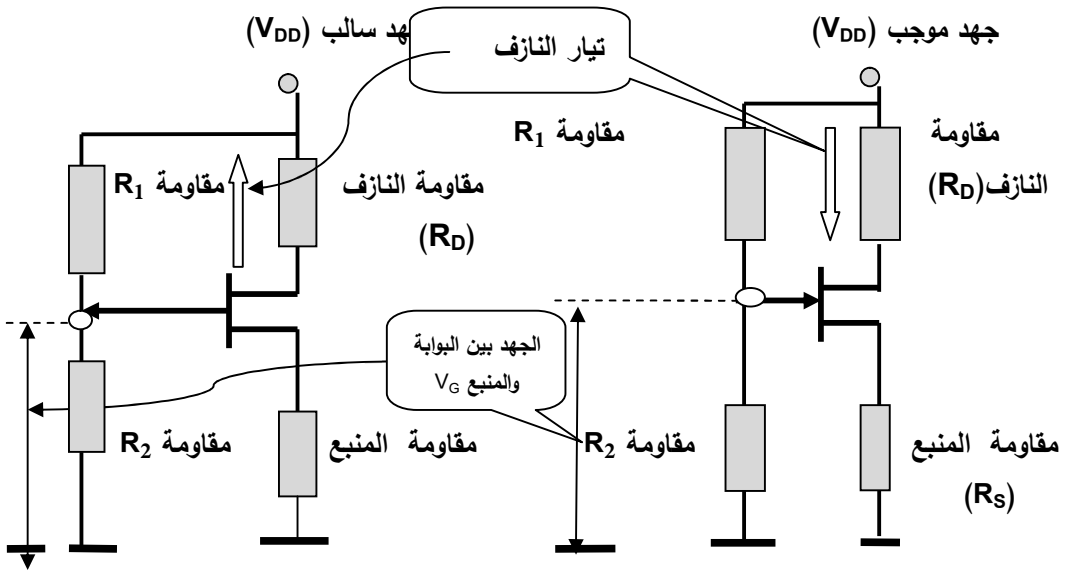


الشكل (٤ – ٢٣) جهد البوابة موجب V_{GG} متصل بالبوابة لتحسين إستقرارية التغذية

يوضح الشكل (٤ – ٢٤ أ) هذا التكوين. تأثير بطارية الدخل (V_{GG}) لتحريك خط الإنحياز على المحور الأفقى الى قيمة جهد الدخل (V_{GG}) كما هو مبين في الشكل (٤ – ٢٤ ب) . معادلة خط الإنحياز:

المعادلة (٤-٢٣) $$V_{GS} = V_{GG} - I_D R_S$$

فى التطبيقات – يتم الحصول على الجهد الموجب من موزع جهد خلال البوابة من بطارية النازف (V_{DD}) كما هو موضح في الشكل (٤ – ٢٤)٠ وحيث أن مقاومة الدخل عند البوابة قيمتها كبيرة جدا يجب الأخذ فى الإعتبار أنها تمثل تأثير حمل على موزع الجهد٠



الشكل (٤ – ٢٤) آلية التغذية الذاتية للترانزستور بإستخدام موزع جهد علاوة على جهد منفصل

وبالتالى فإن قيمة جهد البوابة الى الأرض (V_G) للقناة (ن) تكون:

$$V_G = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right] V_{DD}$$ المعادلة (٤–٢٥)

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$ المعادلة (٤–٢٦)

قيمة جهد البوابة الى الأرض (V_G) للقناة (ب) تكون:

$$V_G = -\left[\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right] V_{DD}$$ المعادلة (٤–٢٧)

المعادلة ($٤-٢٨$) $V_{GS} = V_G + I_D R_S$

مع ملاحظة أن قيمة جهد البوابة الى الأرض (V_G) للقناة (ن) ذات فولتية موجبة وقيمة جهد البوابة الى الأرض (V_G) للقناة (ب) ذات فولتية سالبة٠

- إنحياز التيار المتردد للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة

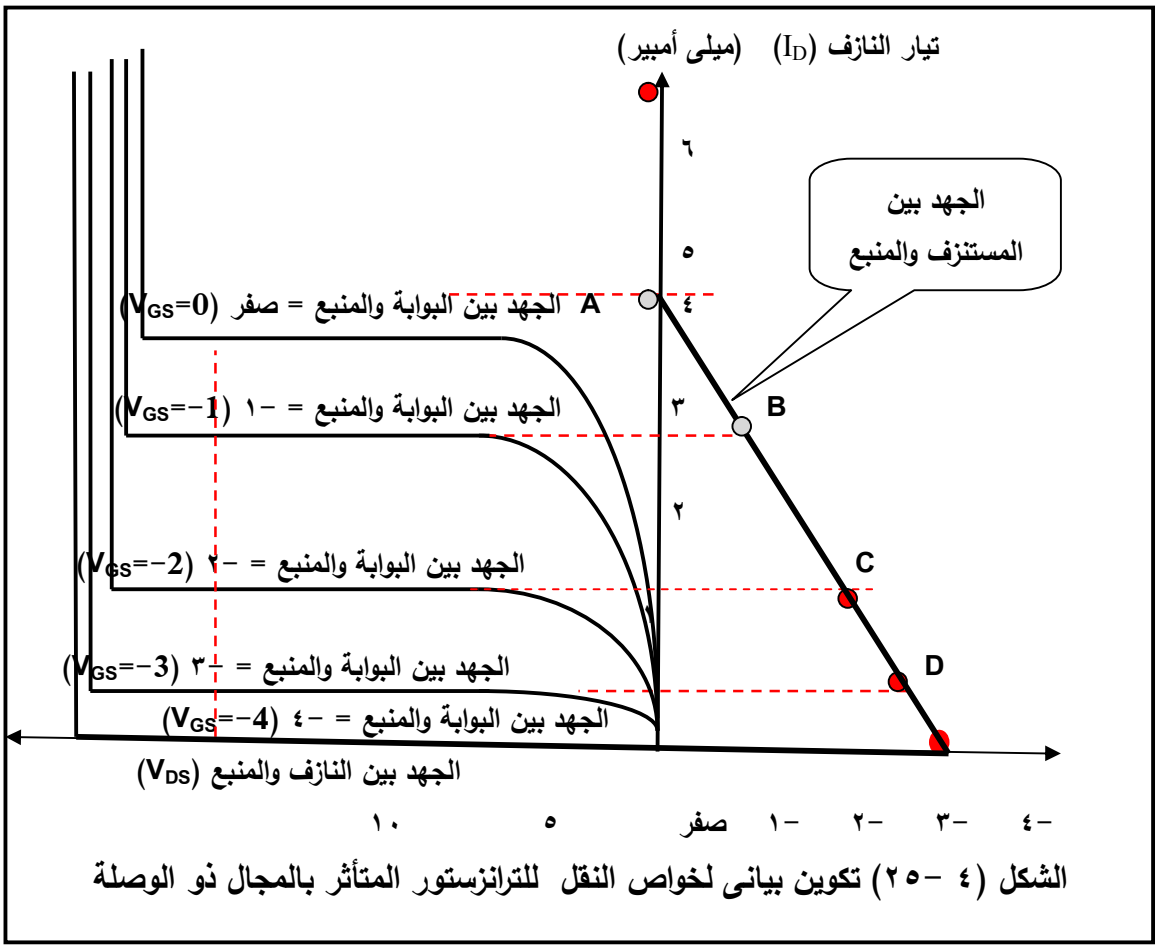
قبل إستخدام الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة كمكبر – يجب أن يكون منحازا بشكل صحيح ، يجب أن يؤخذ في الإعتبار مايلى:

١. أسلوب إختيار نقطة التشغيل (Q)
٢. تصميم معاملات التيار المستمر فى الدائرة
٣. إختيار أمثل الدوائر
٤. إختيار نقطة التشغيل (Q) على أساس أداء التيار المتردد ويشتمل الكسب وإستجابة التردد ومعامل الضوضاء ومستوى المقاومة والتشوية والقدرة والجهد ومعدل سريان التيار

مثل هذه المعلومات متوفرة فى نموذج بيانات الترانزستور – ولنفترض الخواص والمنحنيات فى الشكل ($٤-٢٥$) ٠يجب إختيار نقطة التشغيل فى منطقة إيقاف إندفاع الجهد[٣] لأغراض التكبير الخطى٠ لتكوين منحنيات خواص النقل يجب إختيار قيمة ثابتة للجهد بين النازف والمنبع على سبيل المثال ١٠ فولت ورسم خط عمودى على طول قيمة الجهد (١٠ فولت) ليتقاطع مع منحنى الجهد بين البوابة والمنبع وإستخراج قيمة تيار النازف لكل نقطة تقاطع٠– تستخدم هذه النقاط لإنشاء منحنى النقل الذى يشتمل على نقطتين :

١. قيمة تيار التشبع عند الجهد بين البوابة والمنبع يساوى صفر (فى المثال قيمة تيار التشبع ٤ ميلى أمبير)٠
٢. قيمة إيقاف إندفاع الجهد الذى يمثل قيمة الجهد بين البوابة والمنبع عند قيمة تيار النازف يساوى صفر (فى المثال قيمة إيقاف إندفاع الجهد –٤ فولت)٠

ويمكن أيضا إيجاد نقاط التشغيل بإستخدام معادلة قانون التربيع ومنها يمكن الحصول على منحنى النقل٠ فى النهاية نحاول تحليل دائرة الإنحياز الذاتى بالشكل (٤-٢٦) فى حالة إضافة مولد إشارات التيار المتردد مباشرة الى بوابة الترانزستور (يمكن إستبدال المكثف C_1 بقصر الدائرة) وبالتالى تكتسب البوابة فولتية التيار المستمر للأرض٠



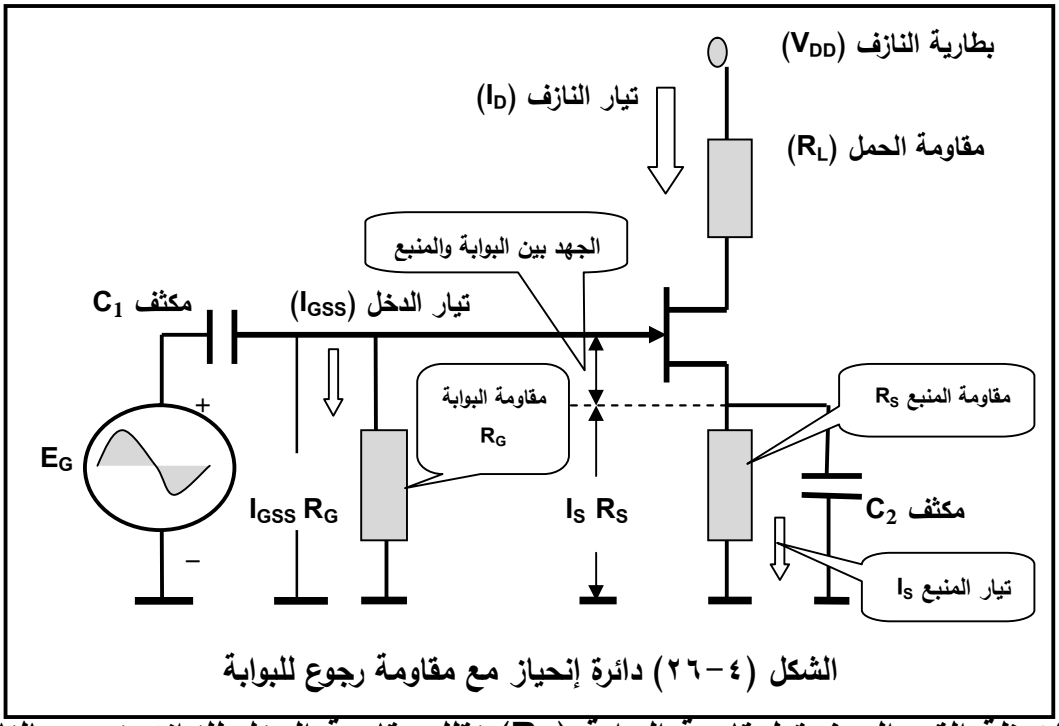
الشكل (٤ -٢٥) تكوين بيانى لخواص النقل للترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة

فى هذه الحالة فلسنا فى حاجة الى مقاومة البوابة (R_G) وأن جهد التيار المباشر الواقع على مقاومة المنبع (R_S) يساوى

$$V_{RS} = I_D R_S = V_{GS}$$

فى حالة أن يكون الترانزستور منحاز الى دائرة سابقة فيجب إستخدام المكثف (C_1) لإبقاء كل مرحلة بمستوى مستقل لا يعتمد على عناصر أخرى وأيضا فى حاجة لمقاومة البوابة (R_G) لتوفير مسار تيار مباشر للتيار المتسرب من البوابة – مما يحافظ على

وجود جهد تيار مباشر على البوابة٠ قيمة مقاومة البوابة صغيرة نسبيا للحفاظ على مستوى التيار المباشر على البوابة أقرب الى فولتية الأرض ($V_{GS} = I_D R_S$) ٠



الشكل (٤–٢٦) دائرة إنحياز مع مقاومة رجوع للبوابة

مع ملاحظة القيم الصغيرة لمقاومة البوابة (R_G) تقلل مقاومة الدخل للترانزستور وبالتالى يجب مراعاة إختيار قيمة مقاومة البوابة (R_G) بطريقة جيدة على أساس أقصى حمل للدائرة٠ من الدائرة نحصل على :

$$I_D = I_S + I_{GSS}$$ المعادلة (٤–٢٩)

من الدائرة فإن أقصى حمل يساوى

$$I_D = I_S + I_{GSS}$$ المعادلة (٤–٣٠)

الجهد الواقع على المقاومة البوابة (R_G)

$$V_{RG} = I_{GSS} R_G = V_{GS} + I_S R_S$$

$$V_{RG} = V_{GS} + R_S V_D - I_{GSS}$$ المعادلة (٤–٣٠)

$$V_{GS} = I_D R_S + I_{GSS} [R_S + R_G]$$ المعادلة (٤–٣١)

تيار البوابة (I_{GSS}) يمكن إهماله ولكن يؤخذ فى الإعتبار التغير فى درجات الحرارة ليس فقط على تيار البوابة (I_{GSS}) ولكن أيضا على تيار التشبع (I_{DSS}) ٠

٤ – ٣ –٢ الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن – أكسيد – سليكون) (م أ س ت م م)[٦]

الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن – أكسيد – سليكون) مشابة الى الترانزستور المتأثر بالمجال ذات الوصلة٠ كلا النوعين بثلاث أطراف (النازف– المنبع – البوابة) وأيضا يتم التحكم فى قناة الترانزستور بالجهد بين البوابة والمنبع٠ الإختلاف الأساسى أن البوابة فى الترانزستور (م أ س ت م م) معزولة عن القناة ولذلك يسمى هذا النوع أيضا الترانزستور المتأثر بالمجال ذو البوابة المعزولة (أى ج ت م م) [٧] وهناك نوعين أحدهما يسمى الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن– أكسيد – سليكون) المستنفد[٨] والآخر الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن – أكسيد – سليكون) المعزز[٩]٠ وجاءت هذه المسميات من إختلاف الأسلوب الذى تتغير فيه موصلية قناة الترانزستور٠

٤–٣– ٢ –١ الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن – أكسيد – سليكون) من النوع المستنفد[٨] ٠ يوضح الشكل (٤– ٢٧) تكوين هذا النوع من الترانزستور ويتكون من شريحة شبه موصل (ب) يتواجد بها بئران من النوع (ن$^{+}$) ٠ وهناك طبقة رقيقة مرسبة من مادة أكسيد السيلكون على كامل سطح الشريحة وكذلك يتواجد وصلة معدنية تخترق طبقة ثانى أكسيد السيلكون عند البئران من النوع (ن$^{+}$) واللذان يمثلان النازف والمنبع٠ بين البئران من النوع (ن$^{+}$) منطقة من النوع (ن) ولكنها خفيفة تركيز الشوائب وهى تكون القناة٠ ترسب طبقة من الألمنيوم على طبقة ثانى أكسيد السيلكون عكس القناة وتمثل البوابة٠ مع ملاحظة أن طبقة ثانى أكسيد السيلكون تعزل البوابة عن القناة وتمتد من البوابة الى المنبع٠ لذا يتألف هيكل االترانزستور من طبقات معدن – أكسيد –

---

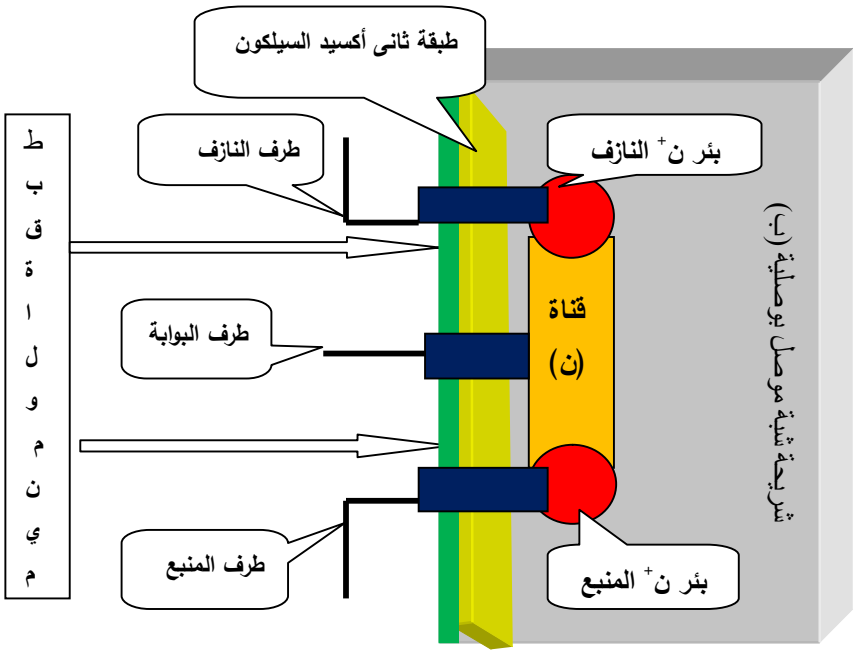
[٦] ((MOSFET)) الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن – أكسيد – سليكون) (م أ س ت م م)

[٧] ((IGFET)) الترانزستور المتأثر بالمجال ذو البوابة المعزولة (أى ج ت م م)

[٨] (DEPLETION TYPE MOSFET) الترانزستور (م أ س ت م م)من النوع المستنفد

[٩] (enhancement type MOSFET) الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن– أكسيد–سليكون) المعزز

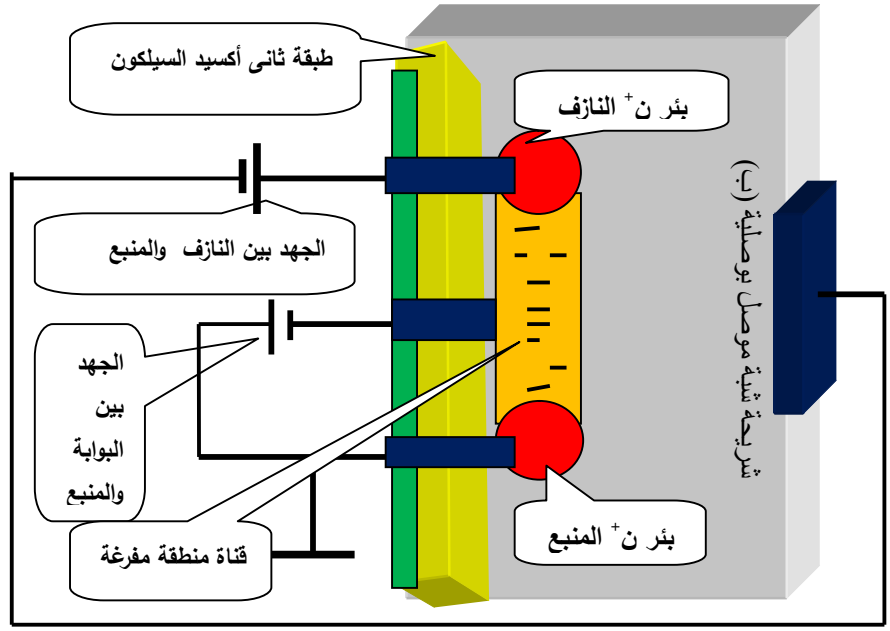
سليكون ولذا أشتق منها إسم الترانزستور (م أ س ت م م)[٦] وأيضا نلاحظ أنه لا يوجد وصلة ثنائية بين البوابة والمنبع مثل الترانزستور المتأثر بالمجال ذات الوصلة ٠



الشكل (٤- ٢٧) تكوين الترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد قناة نوع (ن)

يوضح الشكل (٤- ٢٨) الوضع العادي للتشغيل - الوصلة بين النازف والمنبع لجعل النازف ذات فولتية موجبة بالنسبة الى المنبع - وعادة يتم توصيل الركيزة (الشريحة) بطرف المنبع٠ عندما تكون البوابة سالبة الفولتية بالنسبة الى المنبع بجهد - المجال الكهربائى الناشئ فى القناة يحرك الإلكترونات بعيداً عن سطح القناة بالقرب من الطبقة العازلة من ثان أكسيد السيليكون - وبالتالى يتم تفريغ القناة من شحناتها ويقل سمك القناة وتزداد مقاومتها وبالتالى يتناقص التيار المار من النازف الى المنبع وبالتالى فإن سمك القناة يتم التحكم فيه بتأثير المجال الكهربائى٠ يتطبيق فولتية موجبة بين البوابة والمنبع- تنجذب الإلكترونات أكثر في القناة ويزيد التيار وتزيد أو تعزز موصلية القناة ٠ تتغير قيمة الموصلية قى القناة نتيجة تغير الجهد بين البوابة والمنبع من فولتية موجبة الى فولتية سالبة وكذلك يمكن للترانسستور أن يعمل فى كلا الحالتين ولهذا السبب يسمى

أيضا ترانزستور الإرتقاء والإستنفاد[١٠] .

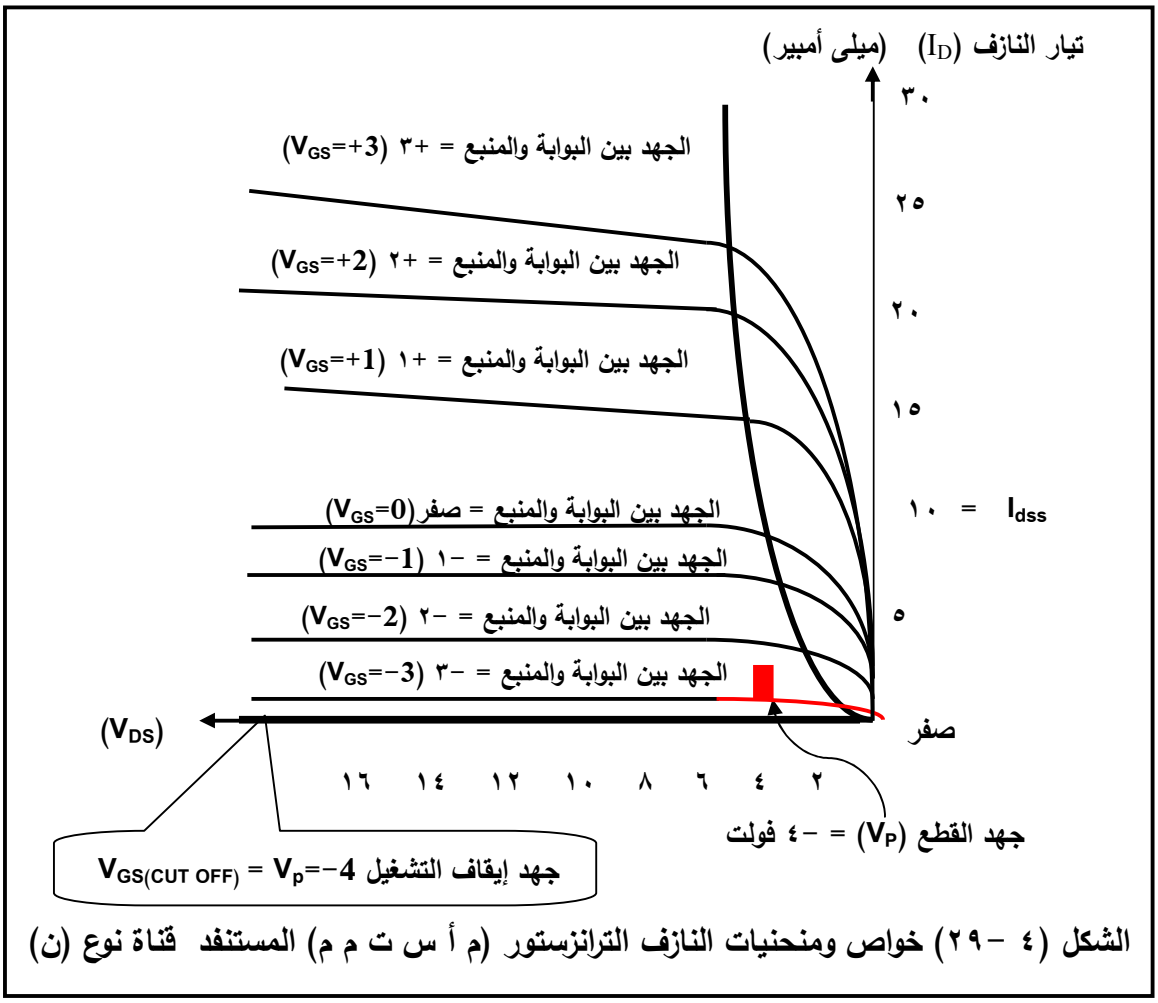


الشكل (٤– ٢٨) آلية تشغيل الترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد قناة نوع (ن)

الوصلة الثنائية (ب – ن) بين المادة (ن) وشريحة الركيزة (ب) ذات تأثير بسيط. يوضح الشكل (٤–٢٩) الخواص ومنحنيات النازف حيث يوضح علاقة تيار النازف بالجهد بين النازف والمنبع لقيم جهد بين البوابة والمنبع ثابت. يزداد تيار النازف خطيا مع الجهد بين النازف والمنبع حتى يصل الى قيمة إيقاف إندفاع الجهد[٣] – بعد الوصول الى قيمة إيقاف إندفاع الجهد يظل تيار النازف ثابت عند قيمة تيار التشبع معتمدا على قيمة الجهد بين البوابة والمنبع . كلما تغير الجهد بين البوابة والمنبع وأصبح بفولتية سالبة أكثر، ترتفع قيمة إيقاف إندفاع الجهد فورا. فى حالة أن يساوى الجهد بين البوابة والمنبع صفر فإن تيار النازف يصل الى مرحلة التشبع عند تيار قيمته متى كانت قيمة الجهد بين النازف والمنبع يساوى سالب قيمة إيقاف إندفاع الجهد ($V_{DS} = - V_p$) وإذا زادت الفولتية السالبة الجهد بين البوابة والمنبع حتى تستنفد كل حاملات الشحنة الموجبة

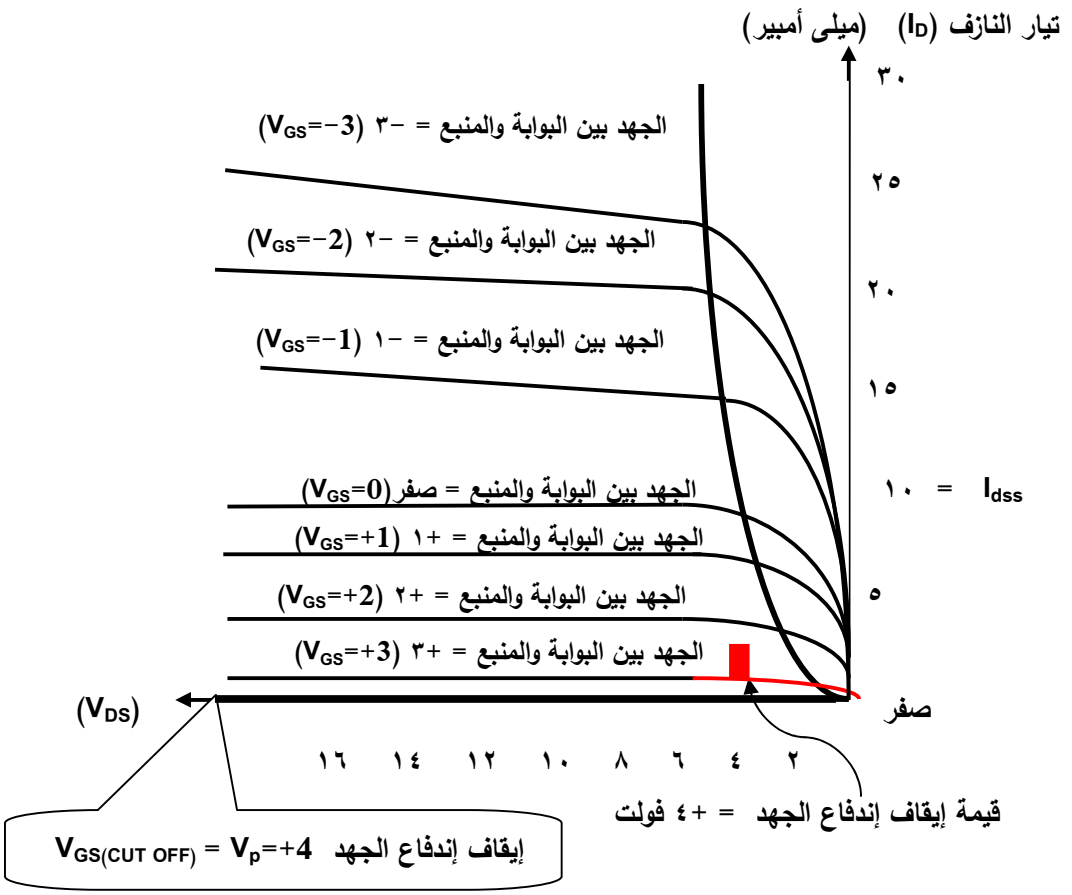
[١٠] يمكن للترانسستور أن يعمل فى كلا الحالتين ولهذا السبب يسمى أيضا ترانزستور الإرتقاء والإستنفاد (for that it is known depletion–enhancement)

من القناة كاملة ينقطع تيار النازف عند قيمة إيقاف إندفاع الجهد الذى يساوى جهد القطع بين البوابة والمنبع ($V_{GS(CUT\ OFF)} = V_p$) ٠ يوضح الشكل (٤-٣٠) خواص ومنحنيات النازف للترانزستور (م أ س ت م م)[٦] المستنفد قناة نوع (ب)٠

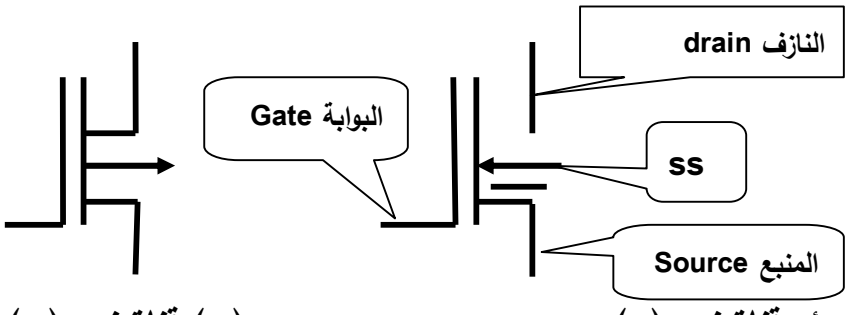


الشكل (٤ -٢٩) خواص ومنحنيات النازف الترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد قناة نوع (ن)

يوضح الشكل (٤-٣١) رموز (م أ س ت م م) للترانزستور المستنفد قناة نوع (ن) والنوع (ب)٠ يشبر السهم الى نوع الترانزستور- إذا كان السهم يشير الى الداخل تكون القناة نوع (ن) وإذا كان السهم يشير الى الخارج فذلك يمثل قناة نوع (ب) مع ملاحظة أن البوابة منفصلة والذى يعنى أن البوابة معزولة عن القناة٠ معادلة خط النقل للترانزستور (م أ س ت م م) متشابهه مع معادلة خط النقل للترانزستور المتأثر بالمجال ذات الوصلة٠



الشكل (٤ -٣٠) خواص ومنحنيات الترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد قناة نوع (ب)



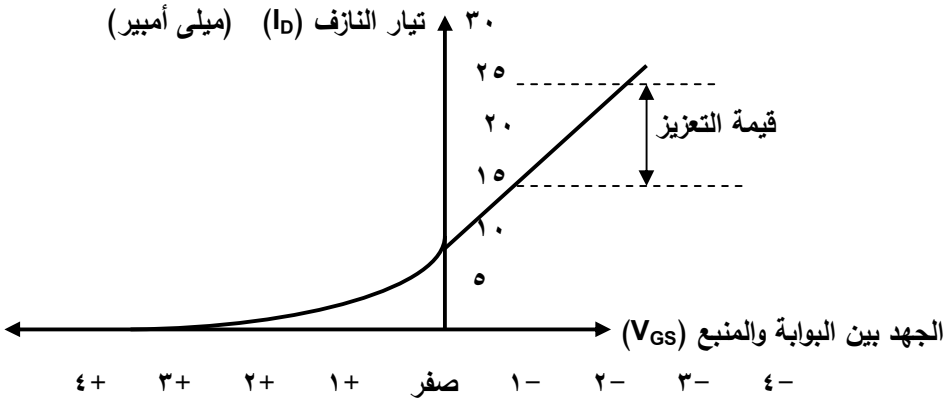
(أ) قناة نوع (ن) (ب) قناة نوع (ب)

الشكل (٤ -٣١) الرموز المستخدمة للترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد للتعريف بنوع موصلية القناة

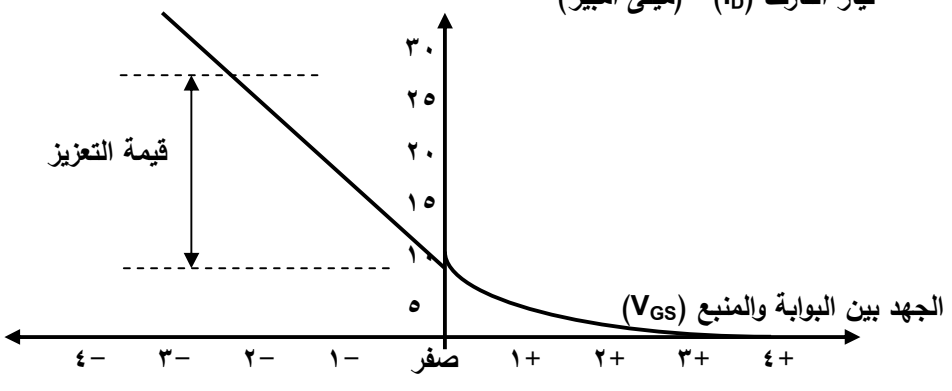
$$I_D = I_{DSS}\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right]^2$$ **المعادلة (٤-٣١)**

مع ملاحظة عند الجهد بين البوابة والمنبع وفولتية موجبة $\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right]^2 \rangle 1$

يوضح الشكل (٤-٣٢) خواص منحنى النقل للترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد قناة نوع (ن) والنوع (ب):



(أ) قناة من النوع (ن)

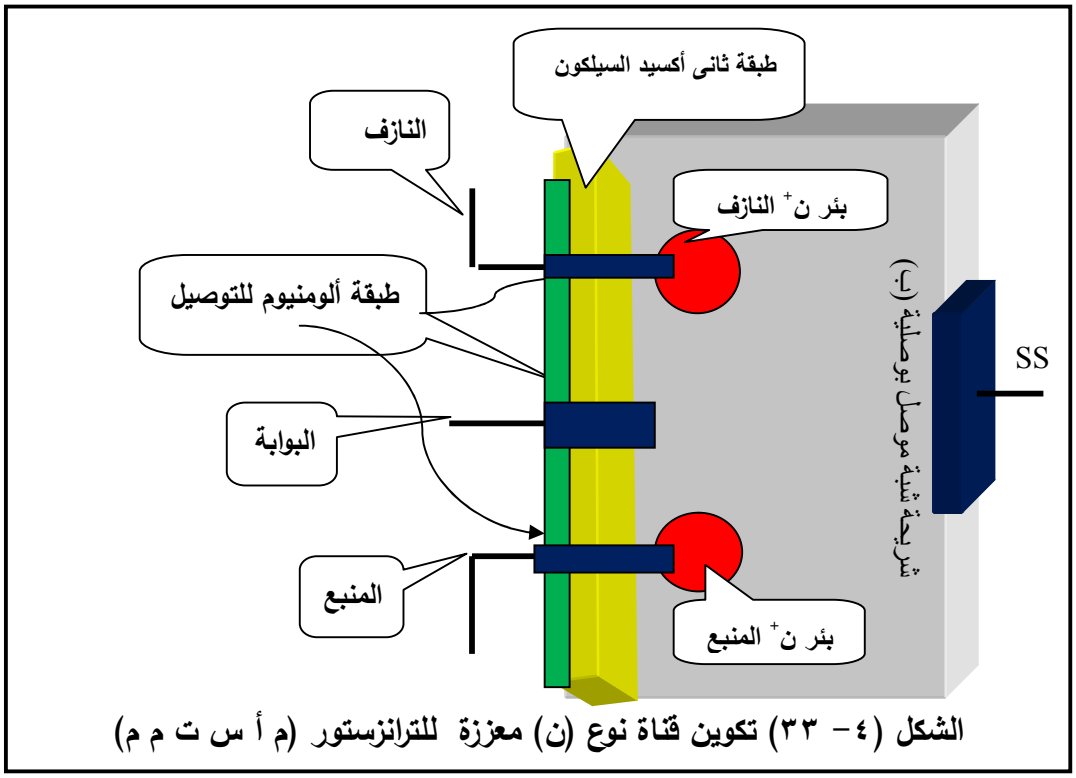


(ب) قناة من النوع (ب)

الشكل (٤ -٣٢) خواص منحنى النقل للترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد لنوعى موصلية القناة (ن) و (ب)

٤-٣-٢-٢ الترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن–أكسيد– سليكون) المعزز[٩]

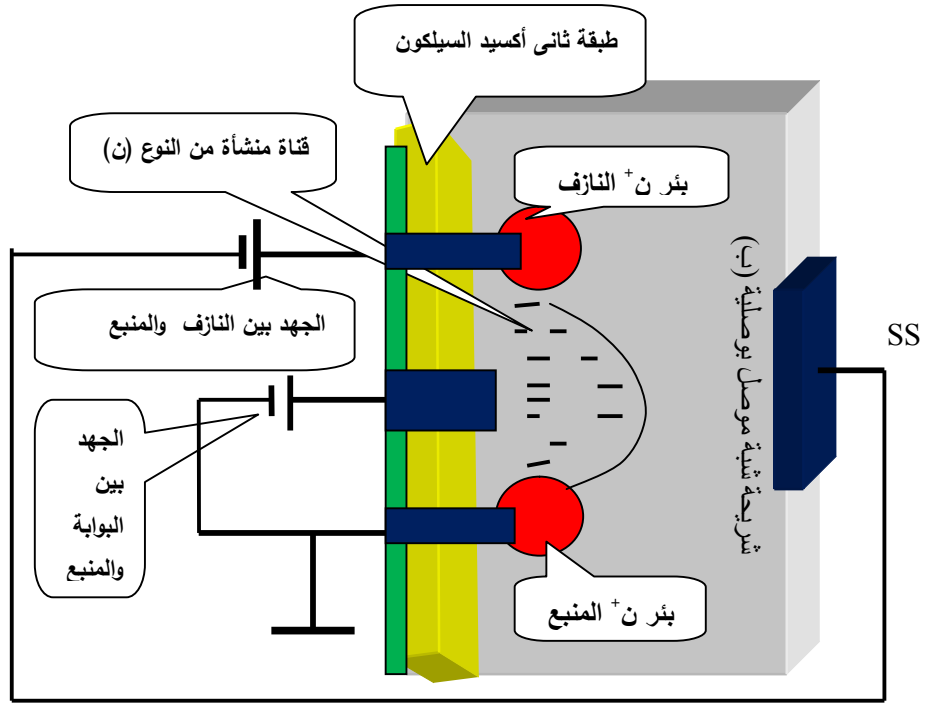
فى هذا النوع لا يوجد منطقة ذات موصلية (ن) بين النازف والمنبع – بدلا منها تمتد شريحة الركيزة من النوع (ب) حتى طبقة الأكسيد العازل من ثانى أكسيد السيلكون بالقرب من البوابة كما هو موضح الشكل (٤-٣٣)٠



الشكل (٤- ٣٣) تكوين قناة نوع (ن) معززة للترانزستور (م أ س ت م م)

يوضح الشكل (٤ -٣٣) وصلات كل من النازف والبوابة والمنبع٠ عادة يتم توصيل شريحة الركيزة الى طرف المنبع (SS) مع ملاحظة أن الجهد بين البوابة والمنبع يجعل فولتية البوابة موجبة بالنسبة الى المنبع٠البوابة ذات الفولتية الموجبة تجذب الإلكترونات من شريحة الركيزة على طول البوابة وبالتالى فإن سطح شريحة الركيزة تحت طبقة ثانى أكسيد السيلكون تتحول الى موصلية من النوع (ن) وهكذا تتشكل قناة من النوع (ن) بين النازف والمنبع٠ فإذا تغيرت فولتية البوابة لتصبح موجبة فستنجذب إلكترونات أكثر الى القناة المنشأة ويتسع سمك القناة مما يزيد قيمة الموصلية التى تتسبب فى زيادة التيار المار من النازف الى المنبع حيث أن تراكم الإلكترونات فى القناة يحول سطحها الى النوع (ن)٠ الترانزستور (م أ س ت م م) المستنفد فى الشكل (٤-٢٨) والشكل (٤-٣٤)

يسمى أيضا الترانزستور (م أ س ت م م) المعزز ذو القناة المستحثة[١١] من النوع (ن)

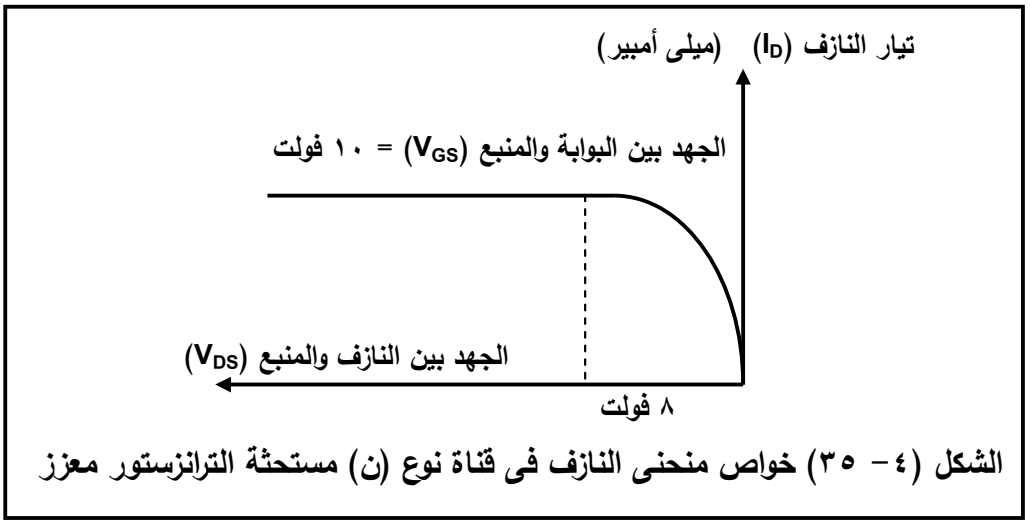


الشكل (٤– ٣٤) آلية تشغيل قناة نوع (ن) مستحثة الترانزستور (م أ س ت م م) المعزز

لا تصبح القناة المنشأة ذات الموصلية (ن) موصلة لتسمح بمرور تيار النازف حتى تصل قيمة الجهد بين البوابة والمنبع الى جهد معين (V_T) ويتراوح بين ١ فولت الى ٣ فولت ، عادة يساوى ٢ فولت٠ عندما يزيد الجهد بين النازف والمنبع تدريجيا أعلى من قيمة الصفر يزداد تيار النازف كما هو موضح بالشكل (٤ – ٣٥)٠ بزيادة الجهد بين النازف والمنبع يقل سمك القناة بالقرب من النازف ويقل تيار المنبع حيث الجهد بين البوابة والنازف يقل عندما يزداد الجهد بين النازف والمنبع مما يتسبب فى تناقص المجال الكهربى الموجب عند النازف٠

---

[١١] (induced channel enhancement type MOSFET) (م أ س ت م م) يشتمل على أربع أطراف بوابة – منبع – نازف – وجسم الشريحة وهناك نوعان قناة (ن) (NMOS) و قناة (ب) (PMOS) – وتشكل الشحنات المستحثة تحت طبقة الأكسيد قناة التوصيل



الشكل (٤ – ٣٥) خواص منحنى النازف فى قناة نوع (ن) مستحثة الترانزستور معزز

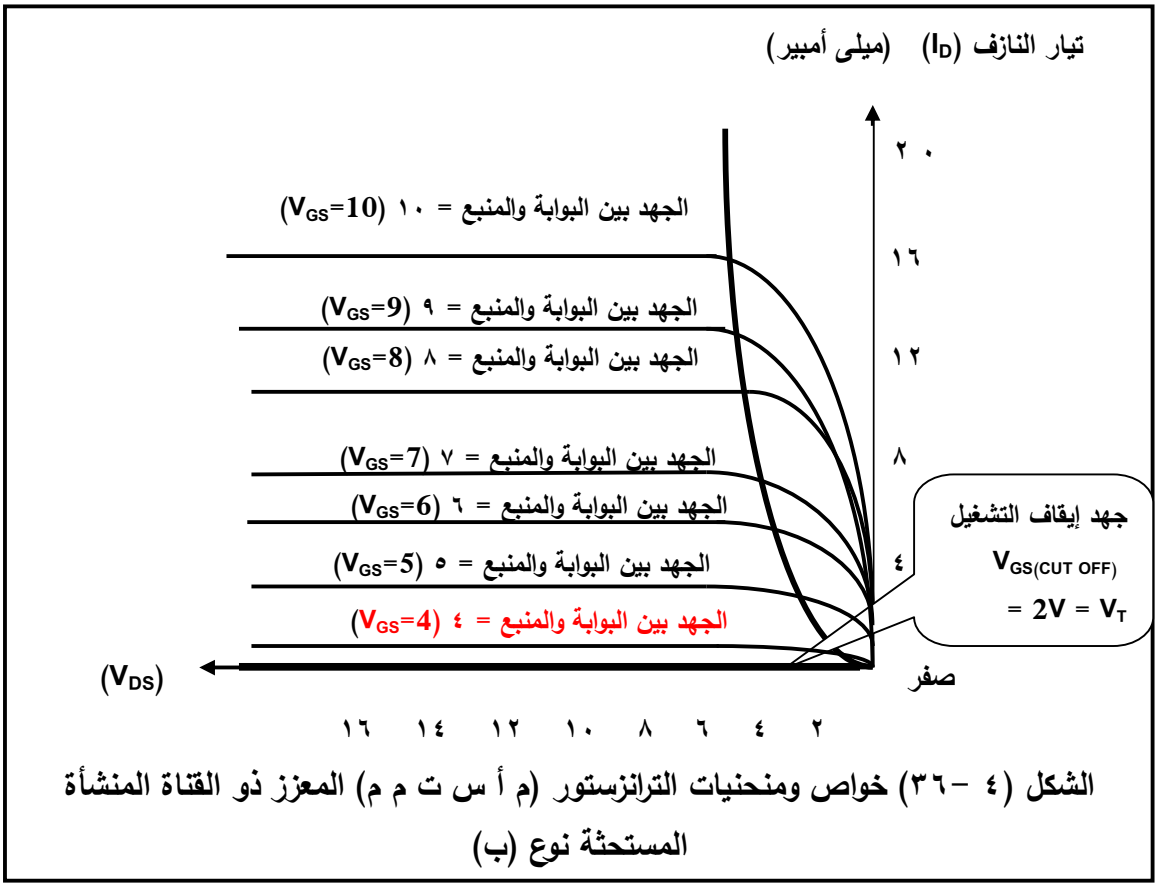
على سبيل المثال إذا كانت قيمة الجهد بين البوابة والمنبع تساوى ١٠ فولت وقيمة الجهد بين النازف والمنبع يساوى ٤ فولت – حيث :

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$$ المعادلة (٤-٣٢)

وبالتالى يمكن إيجاد قيمة الجهد بين البوابة والنازف ويساوى ١٠ – ٤ = ٦ فولت٠ بتقليل قيمة الجهد بين البوابة والنازف تتناقص بنفس الكمية قيمة الجهد بين النازف والمنبع مما يتسبب فى تناقص سمك القناة ويتناقص المجال الكهربائى ويقلل سمك القناة عند النازف وتبدأ مقاومة القناة فى الزيادة ويبدأ إنقطاع تيار النازف٠ عند قيمة الجهد بين النازف والمنبع تساوى ٨ فولت وقيمة الجهد بين البوابة والمنبع تساوى ١٠ فولت فإن قيمة الجهد بين البوابة والنازف ويساوى ١٠ – ٨ = ٢ فولت وتساوى تقريبا الجهد (V_T) ٠ عندما يتساوى الجهد بين البوابة والمنبع مع الجهد (V_T) فإن سمك القناة عند النازف تؤول الى الصفر وبزيادة الجهد بين النازف والمنبع أكثر فذلك لا يؤثر على شكل القناة ويصل تيار النازف الى التشبع – وتحدث ظاهرة التشبع عندما يتساوى ($I_D = I_{DSS}$) عند قيمة الجهد بين النازف والمنبع ($V_{DS(sat)}$)

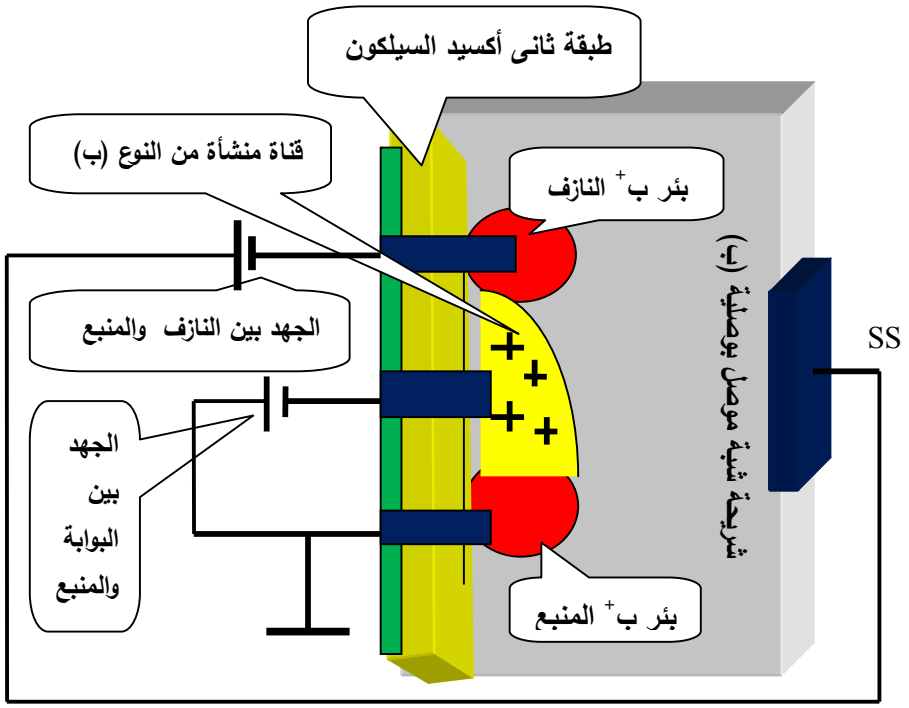
$$V_{DS|SATURATION} = V_{GS} - V_T$$ المعادلة (٤-٣٣)

كما أن قيمة تيار النازف يساوى صفر عندما يتساوى الجهد بين البوابة والمنبع مع الجهد (V_T)٠ القطع الناقص فى الشكل (٤-٣٥) يصل نقاط جهد التشبع بما يحقق المعادلة (٤-٣٤) تسمى المنطقة على يسار خط القطع الناقص منطقة التحكم بالجهد فى المقاومة حيث المقاومة (R_{DC}) تتغير مع الجهد بين البوابة والمنبع٠

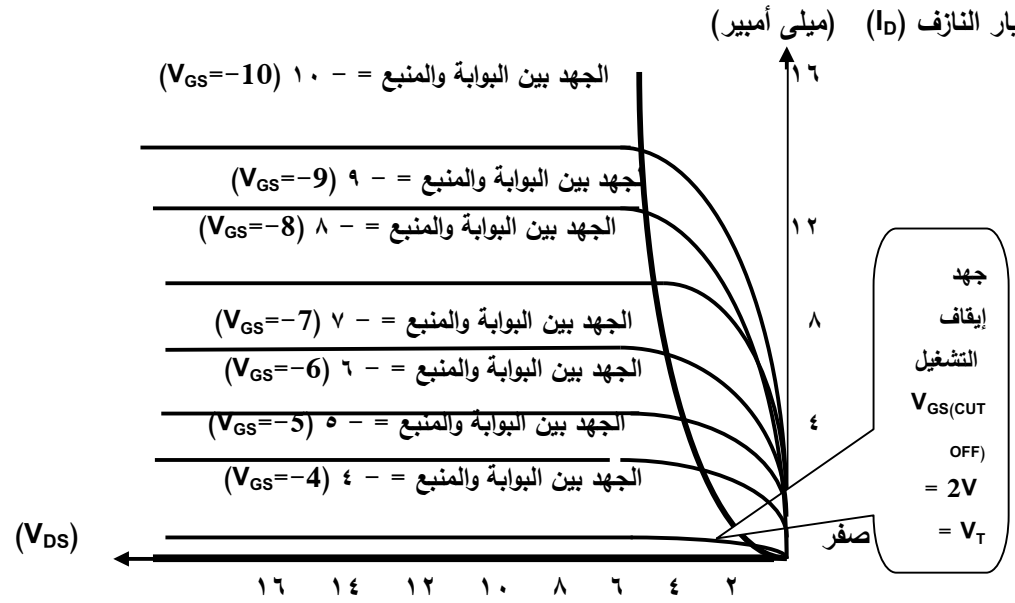


الشكل (٤ -٣٦) خواص ومنحنيات الترانزستور (م أ س ت م م) المعزز ذو القناة المنشأة المستحثة نوع (ب)

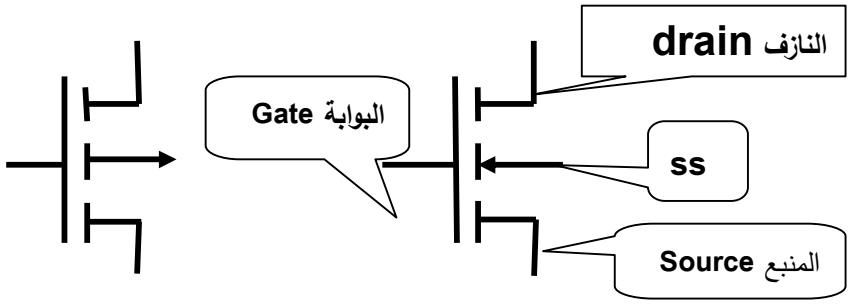
يوضح الشكل (٤-٣٦) آلية تكوين الترانزستور (م أ س ت م م) المعزز ذو القناة المعززة نوع (ب) المستحثة كما يوضح الشكل (٤-٣٧) خواص ومنحنيات النازف للترانزستور (م أ س ت م م) ذو القناة المنشأة المعززة المستحثة نوع (ب) ويوضح الشكل (٤-٣٨) الرموز المهنية المستخدمة لكل من نوعي القناة (ن) و(ب) ٠



الشكل (٤– ٣٧) آلية تشغيل قناة نوع (ب) معززة مستحثة للترانزستور (م أ س ت م م)



الشكل (٤ –٣٨) خواص ومنحنيات المستنزف الترانزستور (م أ س ت م م) المعزز ذو القناة المستحثة نوع (ب)



(ب)قناة نوع (ن)　　(ب) قناة نوع (ب)

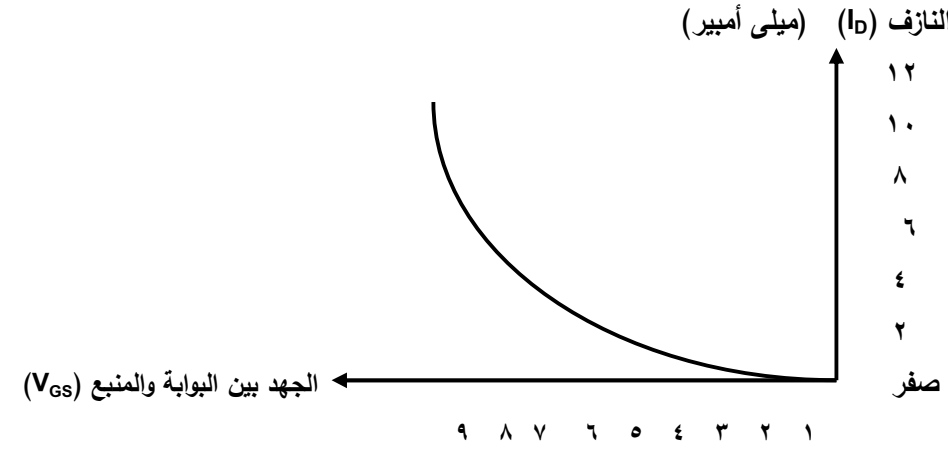
الشكل (٤ –٣٩) الرموز المستخدمة للتعريف بالترانزستور (م أ س ت م م) المعزز ذو القناة المستحثة نوع (ن) و (ب)

٤ – ٣ – ٣ خواص النقل للترانزستور (م أ س ت م م) المعزز

فى المنطقة النشطة – نجد أن تيار النازف والجهد بين البوابة والمنبع ذات علاقة على النحو التالى :

$$I_D = 0.5 / \beta [V_{GS} - V_T]^2$$ **المعادلة (٤–٣٤)**

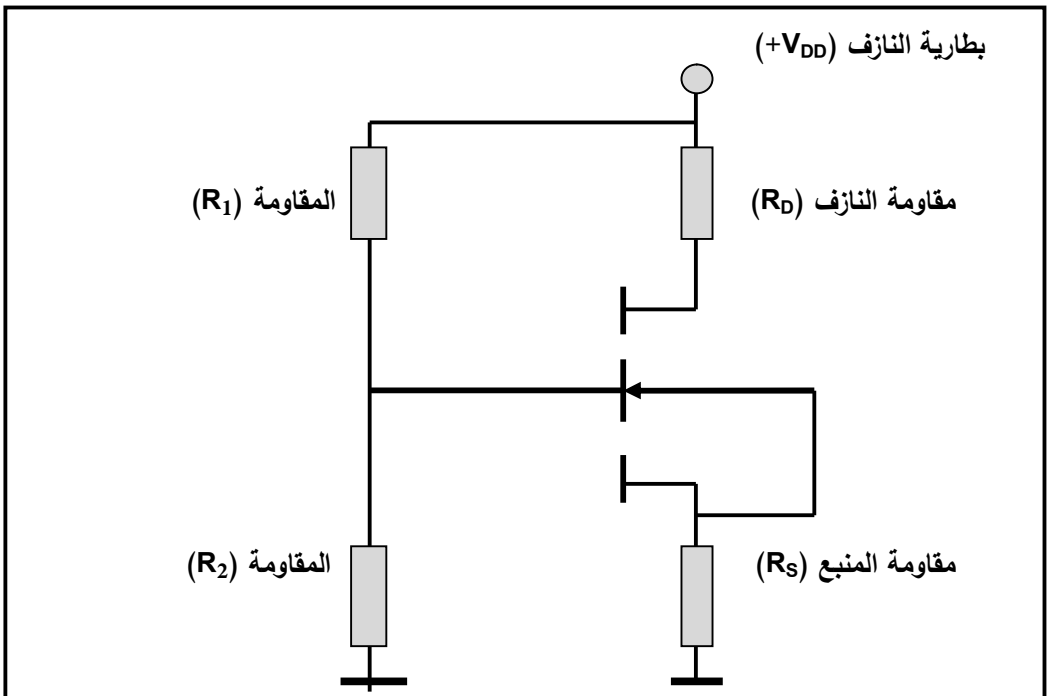
حيث قيمة الجهد بين البوابة والمنبع أكبر من أو يساوى (V_T) والثابت (β) يعتمد على هندسة الترانزستور وهى حوالى ٥و٠ x ١٠$^{-٣}$.



الشكل (٤ –٤٠)خواص منحنى النقل للترانزستور (م أ س ت م م) المعزز حيث (V_T) = ٢ فولت و(β) ٥و٠ x ١٠$^{-٤}$

- **دائرة الإنحياز الترانزستور (م أ س ت م م) المعزز**

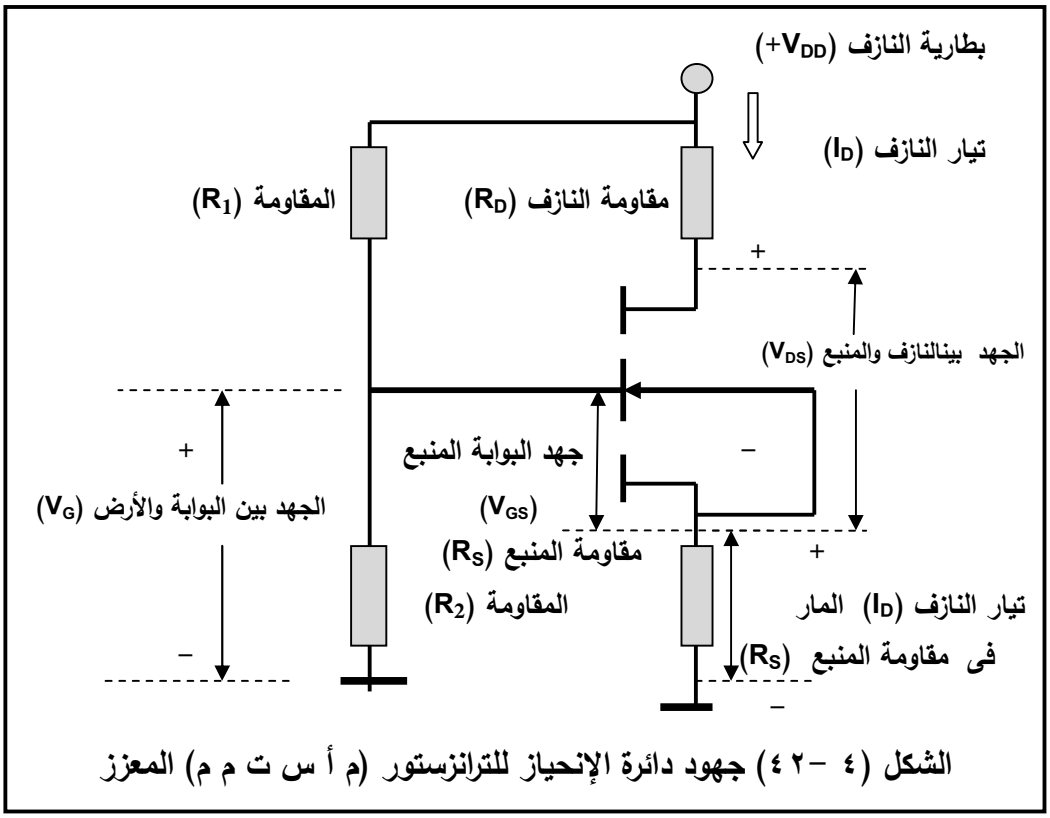
الترانزستور (م أ س ت م م) هو الأكثر إنتشارا فى الدوائر المتكاملة الرقمية كما يستخدم كمكبر فى الأشارات المنخفضة٠ يوضح الشكل (٤ – ٤٠) أحد آليات إنحياز الترانزستور (م أ س ت م م) ذات القناة من النوع (ن) ٠ تستخدم هذه التطبيقات المقاومة (R_S) لتوفير التغذية المرتدة للتحيز لتحقيق الإستقرار – القيمة الكبيرة للمقاومة (R_S) تعطى حساسية أقل لنقطة الإنحياز بسبب التغيرات التى تحدث فى قيم معاملات الترانزستور (م أ س ت م م) بسبب التغير فى درجات الحرارة٠



الشكل (٤ –٤١) دائرة إنحياز الترانزستور (م أ س ت م م) المعزز

يوضح الشكل (٤– ٤١) جهود دائرة الإنحياز للترانزستور (م أ س ت م م) المعزز – المقاومات (R_1) و (R_2) تشكل موزع جهد الذى يحدد قيمة الجهد بين البوابة والأرض ٠ (V_G)

$$V_G = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right] V_{DD}$$ **المعادلة (٤–٣٤)**



الشكل (٤ –٤٢) جهود دائرة الإنحياز للترانزستور (م أ س ت م م) المعزز

مقاومة الدخل كبيرة القيمة (م أ س ت م م) المعزز لا تمثل حمل على موزع الجهد وبالتالى فإن قيمة المقاومة (R_1) و (R_2) عادة تصمم كبيرة القيمة للحفاظ على مقاومة دخل التيار المتردد كبيرة ٠ بكتابة قانون الجهد لكرشيف حول البوابة والمنبع – نجد :

المعادلة (٤–٣٦) قناة نوعية ن $V_{GS} = V_G - I_D R_S$

المعادلة (٤–٣٧) قناة نوعية ب $V_{GS} = V_G + I_D R_S$

المعادلة (٤–٣٨) قناة نوعية ن $V_{DS} = |V_{DD}| + I_D [R_D + R_S]$

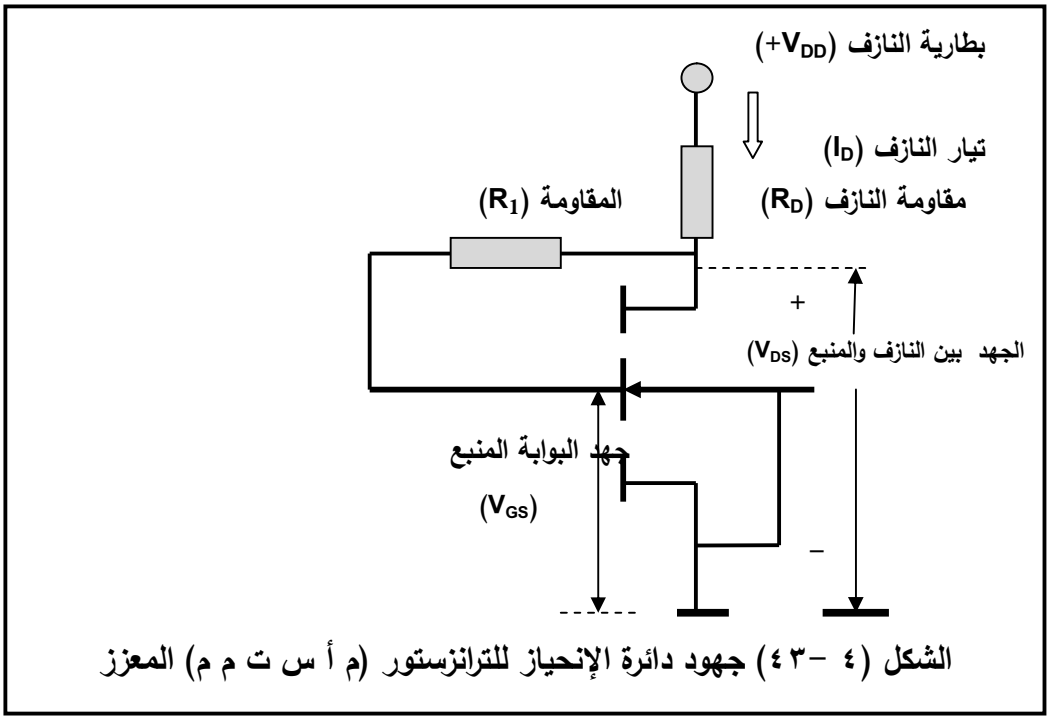
المعادلة (٤–٣٩) قناة نوعية ب $V_{DS} = - |V_{DD}| + I_D [R_D + R_S]$

يمكن إعادة كتابة المعادلة (٤–٣٦) بالشكل التالى:

$$I_D = -\frac{V_{GS}}{R_S} + \frac{V_G}{R_S}$$ **المعادلة (٤–٤٠)**

يمكن رسم المعادلة (٤–٤٠) كمنحنى نقل للترانزستور وتقع نقطة التقاطع لقيمة تيار

الإنحياز للنازف ومنحنى الجهد بين البوابة والمنبع ٠ يوضح الشكل (٤ – ٤٢) طريقة أخرى لتغذية القناة نوعية (ن) للترانزستور المتأثر بالمجال ذو التكوين (معدن – أكسيد – سليكون) ٠ المقاومة (R_g) وهى عادة عالية القيمة متصلة بين طرف النازف والبوابة ولا يمر بها تيار بسبب مقاومة عالية القيمة عند البوابة٠



الشكل (٤ –٤٣) جهود دائرة الإنحياز للترانزستور (م أ س ت م م) المعزز

وحيث لا يوجد جهد واقع على المقاومة (R_g) . وبالتالى فإن الجهد بين البوابة والمنبع يساوى الجهد بين النازف والمنبع – وبالتالى فنحن متأكدين أن الجهد بين النازف والمنبع أكبر من الجهد بين البوابة والمنبع سالب ($V_{DS}>V_{GS} - V_T$) والذى يؤكد أن إنحياز الترانزستور فى المنطقة النشطة وأن مقاومة البوابة (R_g) توفر ردود الفعل السلبية على إستقرار نقطة التحيز٠ على سبيل المثال أن يكون تيار النازف يتزايد لأى سبب وبالتالى يوجد جهد كبير واقع على مقاومة النازف (R_D) ويتناقص الجهد بين النازف والمنبع ولكن حيث أن الجهد بين البوابة والمنبع يساوى الجهد بين النازف والمنبع

فهذا يعنى تناقص قيمة الجهد بين البوابة والمنبع مسببا تناقص تيار النازف٠

من الشكل (٤ -٤٢)

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \qquad \text{المعادلة (٤-٤١)}$$

وحيث الجهد بين البوابة والمنبع يساوى الجهد بين النازف والمنبع تصبح المعادلة (٤-٣٤) على النحو التالى:

$$I_D = 0.5\ \beta\ [V_{DS} - V_T]^2 \qquad \text{المعادلة (٤-٤٢)}$$

الطريقة المباشرة لحل قيم الجهد بين النازف والمنبع وحبث أن تيار النازف فى المعادلتين (٤-٤١) و(٤-٤٢)

$$V_{DS} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \qquad \text{المعادلة (٤-٤٣)}$$

مع التعويض بقيم الثوابت ($a = 0.5\ \beta$) & ($b = (1/R_D) - \beta V_T$) وحيث

$$C = 0.5\ \beta\ V_T^2 - (V_{DD}/R_D)$$

بالتعويض فى القيم الجهد بين النازف والمنبع فى المعادلة (٤-٤٣) يمكن الحصول على قيمة تيار النازف ٠

٤-٢-٤ ملخص لأنواع الترانزستور المتأثر بالمجال

من المهم تلخيص الأنواع الأساسية للترانزستور المتأثر بالمجال – يوضح الجدول (٤-٥) أنواع الترانزستور والمعلومات المطابقة لكل نوع من التشغيل مع مراعاة القطبية.

الجدول (٤-٥)

نوع الترانزستور المتأثر بالمجال	وضع التشغيل	الجهد بين النازف والمنبع	الجهد بين البوابة والمنبع	التوصية
الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة قناة موصلية (ن)	إستنفاد Depletion	+	–	يمكن أن يكون الجهد بين البوابة والمنبع ذو فولتية موجبة بسيطة ويحدث جهد القطع عند $\|V_{GS}\|<\|V_{GS(OFF)}\|$
الترانزستور المتأثر بالمجال ذو الوصلة قناة موصلية (ب)	إستنفاد Depletion	–	+	يمكن أن يكون الجهد بين البوابة والمنبع ذو فولتية سالبة بسيطة ويحدث جهد القطع عند when $\|V_{GS}\|<\|V_{GS(OFF)}\|$
ترانزستور (م أ س ت م م) قناة موصلية (ن)	تعزيز Enhancement	+	+	يتم التوصيل عند $\|V_{GS}\|>\|V_{GS(OFF)}\|$
ترانزستور (م أ س ت م م) قناة موصلية (ب)	تعزيز Enhancement	–	–	يتم التوصيل عند$\|V_{GS}\|>\|V_{GS(OFF)}\|$
ترانزستور (م أ س ت م م) قناة موصلية (ن)	استنفاد – تعزيز Depletion Enhancement	+ +	– +	عادة فى وضع تشغيل ويحدث القطع عند $\|V_{GS}\|$ more negative than $V_{GS(OFF)}$
ترانزستور (م أ س ت م م) قناة موصلية (ب)	استنفاد – تعزيز Depletion Enhancement	– –	+ –	عادة فى وضع تشغيل ويحدث القطع عند $\|V_{GS}\|$ more positive than

				$V_{GS(OFF)}$

من الجدول يمكن ملاحظة أن كل الترانزستور المتأثر بالمجال ذو قناة موصلية (ن) تعمل بفولتية موجبة لقيم الجهد بين النازف والمنبع بينما يعمل كل الترانزستور المتأثر بالمجال ذو قناة موصلية (ب) تعمل بفولتية سالبة لقيم الجهد بين النازف والمنبع٠ التشغيل في وضع الإستنزاف يستخدم مصدر جهد البوابة عكس القطبية بالنسبة الى الجهد بين النازف والمنبع – من جهه أخرى٠ تتطلب العملية تعزيز وضع الجهد بين البوابة والمنبع والجهد بين النازف والمنبع بذات القطبية٠

الجدول (٤-٦)

خواص ألترانزستور أحادى الوصلة عند درجة حرارة الغرفة العادية (٢٥ م°)

جهد الباعث العكسى (V_{BRE}) = ٣٠ فولت
جهد القاعدة الداخل (V_{BB}) = ٣٥ فولت
أقصى ذروة لتيار للباعث (I_{EMP}) = ٢ أمبير
الحد الأقصى لمتوسط الطاقة ($I_{C(MAX)}$)
مقاومة دخل القاعدة (R_{BB})
نسبة المواجهه الجوهرية (η) من ٥٦و٠ الى ٧٥و٠
تيار الباعث المتسرب (I_{eo}) ١٢ ميكرو أمبير بحد أقصى عند جهد دخل (V_{BB}) = ٣٠ فولت
أصغر تيار (I_V) ٤ ميلى أمبير عند جهد دخل (V_{BB}) ٢٠ فولت
أصغر جهد (V_V) قيمة نموذجية ٢ فولت عند جهد دخل (V_{BB}) ٢٠ فولت
نقطة التيار القصوى (I_P) ٥ ميكرو أمبير جهد دخل (V_{BB}) ٢٥ فولت