كلية العلوم التطبيقية

قسم الفيزياء الحياتية

المرحلة الثالثة

الإلكترونيات

أ.م.د. غسان عدنان الهيتي

ـ المحاضرة السابعة ـ

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ترانزستورات تأثير المجال Field – Effect Transistors

يعتبر ترانزستور تأثير المجال العمود الفقري لدوائر المتكاملة وهو يفضل على الترانزستور الثنائي القطبية BJT في عدة نواح منها :

1.سهولة تصنيعه وكذلك صغر المساحة التي يحتلها لذا فانه أكثر استعمالا وملائمة في الدوائر المتكاملة .$I.C$ وكذلك أطول عمراً واكبر كفاءة من الترانزستور الثنائي القطبية.

2.يمتلك ممانعة إدخال عالية جدا (عادة ما تكون اكبر من 100ميكا اوم) مقارنة مع ممانعة الإدخال الصغيرة للترانزستور الثنائي القطبية وذلك لان دائرة الإدخال لهذا الترانزستور تكون ضعيفة بسبب كونه منحاز أماميا.

3.يكون اقل عرضة للتأثيرات الحرارية.

4.يكون اقل توليدا للضوضاء (ويقصد بالضوضاء بالتغيرات الكهربائية التي تسببها حركة الالكترونات) التي تظهر على شكل إشارات غير مرغوب فيها عادة مع موجة الإخراج التركيب الشبة الموصل.

5.يمكن استعماله عند الترددات العالية وذالك لان حركه الحاملات في القناة لا تتم عن طريق الانتشار بل في مجل معجل وحيث أن تردد القطع لايتحدد عملياً بزمن مرور الحاملات في القناة بل بسعة الملتقى P-N لذا فان ترانزستور تأثير المجال يفصل على ترانزستور ثنائي القطبية كثيراً في هذا الخصوص.

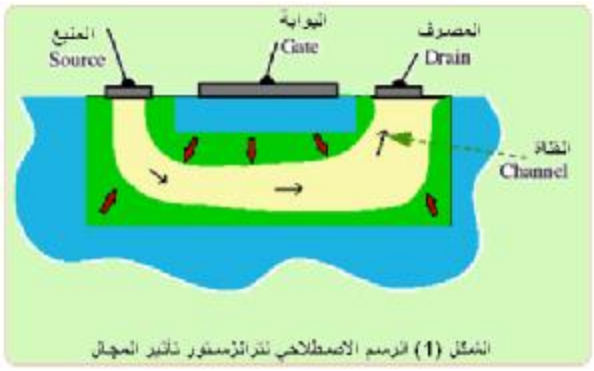
إن أساس عمل الترانزستور تأثير المجال هو التحكم في قيمة التيار الخارج بواسطة التأثير الذي يحدثه المجال الكهربائي الناتج عن تسليط جهد على مسار هذا التيار، ومن هذا جاءت التسمية ترانزستور تأثير المجال ويسمى أيضا بالترانزستور الأحادي القطبية وذلك لان التيار الناتج يعتمد على حركة نوع واحد من الحاملات الشحنة أما الالكترونات أو الفجوات وذلك حسب نوع القناة المستعملة في الترانزستور . وهناك نوعين رئيسين من ترانزستور تأثير المجال هما :

1.ترانزستور المجال ألوصلي Junction Field – Effect Transistor أو اختصارا JFET.

2.ترانزستور تأثير المجال ذو القاعدة المعزولة Insulated- Gate Effect Transistor أو اختصارا بـ JGFET. ويسمى أيضا بالترانزستور ذي الاوكسيد المعدني Metal –Oxide Semiconductor Transistor أو اختصارا MOSFET ويعمل كلا النوعين على نفس الأساس وهو التحكم بالتيار بواسطة مجال كهربائي إلا أن لهما بعض الخواص المختلفة .

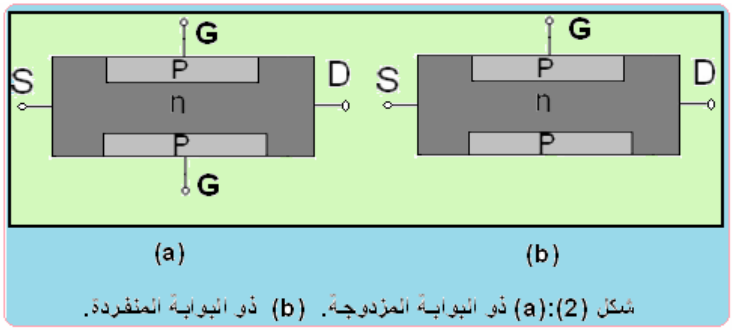
ترانزستور المجال ألوصلي (JFET) :

المكونات: يبين الشكل (1) الرسم الاصطلاحي لترانزستور تأثير المجال هو عبارة عن لوح من شبه موصل أم سالب N وإما موجب P (غالبا ما يكون اللوح من السيلكون) إلا في حالات الاستعمال الخاصة في الترددات العالية مثلا فيكون من (الكالسيوم ارسينايد CaAs) ويسمى بالقناة channel وتسمى النهاية السفلى من القناة بالمنبع Source أما النهاية العليا من القناة فتدعى بالمصرف drain ويلاحظ من الشكل الموجود وصلتين من شبه موصل مخالف لمادة اللوح وعلى وجهتي القناة تدعى كل من هاتين الوصلتين بالبوابة gate .



الشكل (1) الرسم الاصطلاحي لترانزستور تأثير المجال

عندما يربط طرف خارج منفصل لكل بوابة يدعى المكون باسم ترانزستور المجال ألوصلي ذي البوابة المزدوجة dual-gate كما في شكل (2a) . أما إذا ربطت البوابتان داخليا يمتلك الترانزستور طرف البوابة خارجيا واحدا فان الترانزستور



شكل (2):(a) ذو البوابة المزدوجة. (b) ذو البوابة المنفردة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

سيدعى بذي البوابة المنفردة Single-gate كما في شكل (2b)وعليه فان ترانزستور تأثير المجال يحوي على ثلاثة أطراف وهي :

١- المنبع (S) Source:

وهو الطرف الذي تدخل من خلاله حاملات التيار الأغلبية (الالكترونات أو الفجوات) ويعرف التيار الداخل إليه أو الخارج منه بتيار المصرف ويرمز له بـ I_D هذا ويناظر **S** في ترانزستور تأثيرا المجال الباعث **E** في الترانزستور الثنائي القطبية .

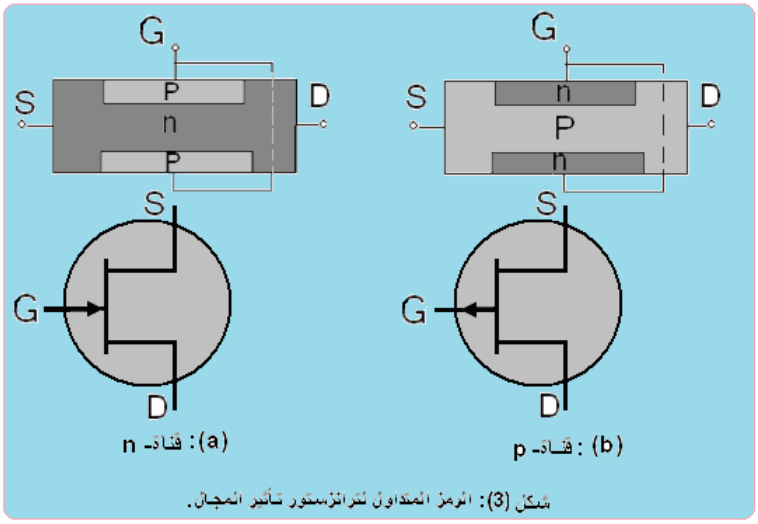
٢- المصرف (D) Drain:

وهو الطرف الذي تخرج منه الحاملات التيار الأغلبية مولدة تيار يعرف بتيار المصرف I_D في الترانزستور الاعتيادي مما يناظر المصرف الجامع **C** في الترانزستور ثنائي القطبية

٣- البوابة (G) Gate :

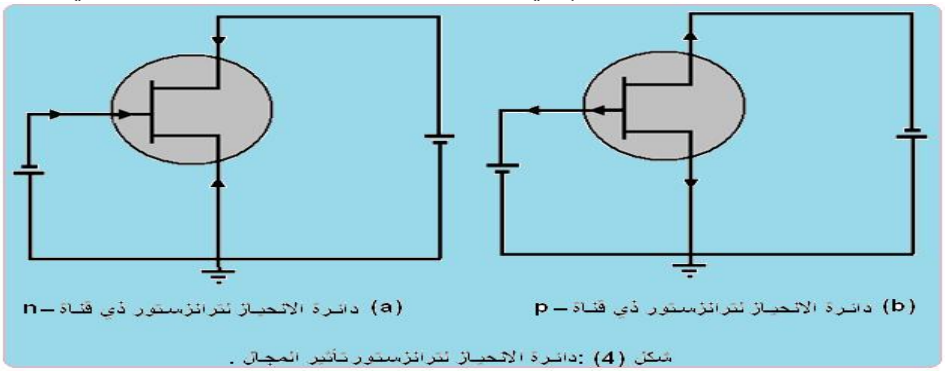
تكون البوابة من مادة معاكسة لنوع مادة المنبع والمصرف وتركب على وجهي القناة بطريقة السبك أو الانتشار ويكون منسوب التطعيم في القناة اكبر منه في القناة، ويناظر **G** طرف البوابة في ترانزستور تأثيرا المجال طرف القاعدة **B** في الترانزستور الاعتيادي.

يدعى ترانزستور تأثير المجال إذا كانت مادة اللوح (القناة التابعة له) من شبه الموصل سالب ، بترانزستور تأثير المجال ذي القناة – n ويرمز له بالشكل (3a) ،وتكون حاملات الشحنة في هذه الحالة الالكترونات .أما إذا كانت مادة اللوح من شبه الموصل موجب فان حاملات الشحنة ستكون هذه المرة هي الفجوات ويدعى ترانزستور بترانزستور تأثير المجال ذي القناة - p ويرمز له بالشكل (3b).يلاحظ في الشكل (3) أن السهم في كلا النوعين يكون عموديا على مركز القناة ،وذلك لإمكانية استبدال المنبع مع المصرف في العديد من ترانزستورات المجال ألوصلي بحيث يمكن استعمال أي نهاية كمنبع واستعمال الأخرى كمصرف ،وهذا ما لا يصح عمله في الترانزستور الثنائي القطبية حيث يكون الجامع اكبر حجما واقل تطعيما من الباعث ،ويشير اتجاه السهم إلى اتجاه التيار الذي يسري في دائرة البوابة عندما تكون منحازة أماميا.



شكل (3): الرمز المتداول لترانزستور تأثير المجال.

طريقة ربط ترانزستور المجال ألوصلي :خلافا لما عليه الحال في الترانزستور الثنائي القطبية-من حيث أن التيار يسري عبر وصلة أل pn- فان سريان التيار في ترانزستور المجال ألوصلي يتم من خلال القناة ،ويبين الشكل (4a) مبدأ توصيل ترانزستور المجال ألوصلي ذي القناة –n في الدوائر الالكترونية،بينما يشير الشكل (4b)إلى كيفية ربط ترانزستور المجال ألوصلي ذي القناة –p. من الشكل (4) يلاحظ أن الجهد بين البوابة والمنبع V_{GS} قد اختير (في كلا الحالتين) بحيث تكون البوابة منحازة عكسيا وبذلك فأن تيارا صغيرا سوف يسري في طرف البوابة بحيث تكون قيمته كتقريب أولي مساوية للصفر.



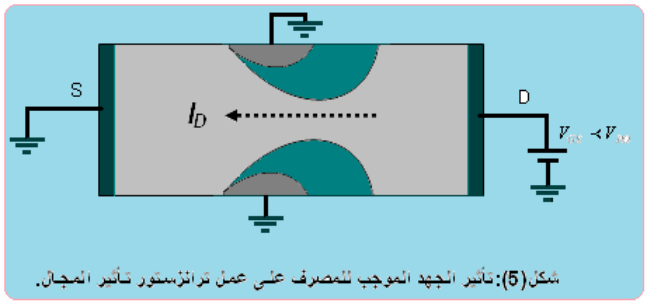
شكل (4): دائرة الانحياز لترانزستور تأثير المجال .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

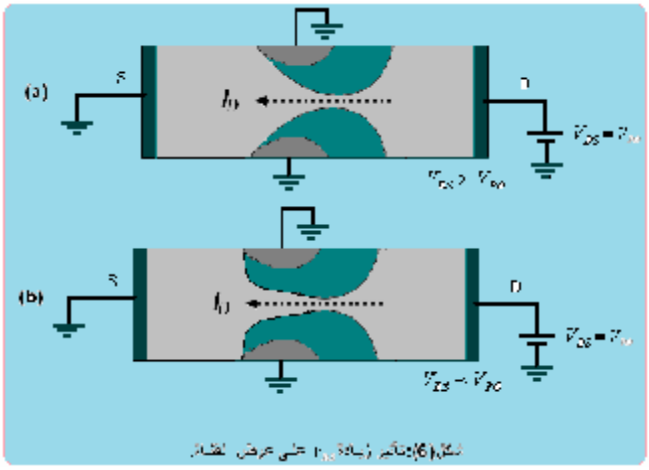
ما جاء أعلاه يتبين لنا أن الفرق الرئيس بين ترانزستور المجال ألوصلي و الترانزستور الثنائي القطبية هو أن البوابة تكون منحازة عكسيا في الأول بينما تكون في الثاني منحازة أماميا. هذا الفرق الحاسم بين الاثنين يشير إلى أن ترانزستور المجال ألوصلي يعمل كجهاز منضبط بالجهد ،حيث يسيطر جهد الإدخال وحده على تيار الإخراج الذي يختلف عن و الترانزستور الثنائي القطبية حيث إن هذا الأخير يعد جهازا منضبط بالتيار ذلك لان تيار الإدخال يتحكم بتيار الإخراج.كذلك يمكن تلخيص الفرق بين الترانزستورين بدلالة ممانعة الإدخال ذلك كون إن تيار البوابة ترانزستور المجال ألوصلي صغيرا جدا ،يعني أن مقاومة الإدخال لهذا الترانزستور تقترب من ما لا نهاية وهي تساوي عدة ميكا اوم معتمدة على JFET.لذا يفضل أل JFET في التطبيقات التي نحتاج فيها إلى مقاومة إدخال عالية. إن الثمن الذي ندفعه مقابل مقاومة الإدخال العالية هذه هو سيطرة اقل على تيار الإخراج أو بعبارة أخرى يكون أل JFET اقل حساسية للتغيرات في جهد الإدخال من ترانزستور الثنائي القطبية. كذلك يلاحظ من الشكل (4) إن الجهد بين المصرف والمنبع V_{DS} قد اختير بحيث إن حركة حاملات الشحنة(الالكترونات والفجوات) تكون باتجاه المصرف.

مبدأ عمل ترانزستور المجال ألوصلي:

لفهم عمل ترانزستور المجال ألوصلي سنأخذ ترانزستور بقناة من نوع n ونفترض كذلك إن المنبع والبوابتين عند الجهد الصفري ثم نحاول دراسة التأثير الذي يحدثه تسليط جهد موجب صغير على المصرف انظر شكل(5).إن وجود مثل هذا الجهد الموجب بين المصرف والمنبع سوف يؤدي إلى سريان الالكترونات من المنبع إلى المصرف (بينما يسري التيار من المصرف إلى المنبع)وان قيمة هذا التيار تعتمد في البداية على الأقل تعتمد على قيمة مقاومة القناة (هذه الأخيرة هي دالة لمنسوب التطعيم في القناة وكذلك عرضها وطولها وسمكها).من جهة أخرى فأن تسليط جهد موجب على المصرف سيؤدي كذلك إلى إحداث جهد انحياز سالب على وصلة أل PN الذي يكونها كل من المصرف أو المنبع (أي جسم القناة)مع البوابة.وبذلك فأن تيار صغيرا سيسري في دائرة البوابة.



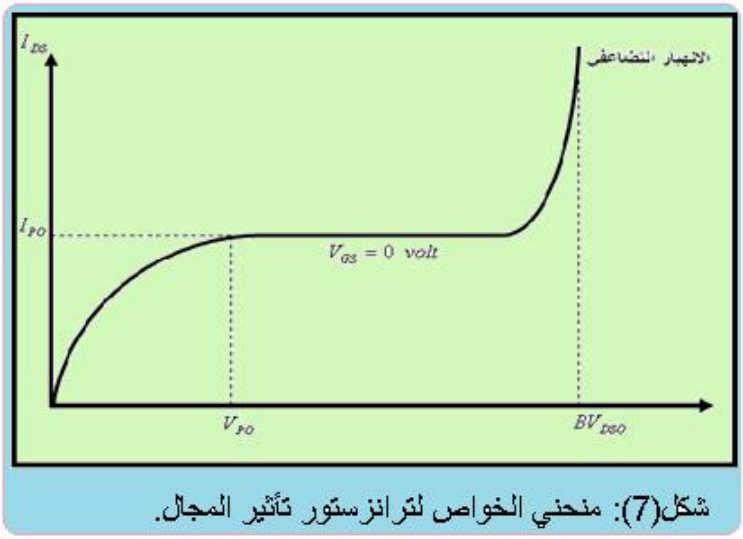
شكل(5):تأثير الجهد الموجب للمصرف على عمل ترانزستور تأثير المجال.



شكل(6):تأثير زيادة V_{DS} على عرض القناة.

مما تقدم يتضح لنا أن زيادة جهد المصرف V_{DS} سوف يؤدي إلى زيادة جهد القناة العكسي وبالتالي إلى زيادة مساحة منطقة الاستنزاف (الموجودة عادة في وصلة إل PN) حول البوابة نتيجة لاندفاع الالكترونات نحو الطرف الموجب من مصدر الجهد والفجوات نحو الطرف السالب منه مؤديا بذلك إلى إحداث منطقة خالية من الشحنات الحرة حول البوابة وكلما زاد اتساع منطقة الاستنزاف انظر شكل (6).

هذه النتيجة تنطبق ع بشكل مباشر على ترانزستور المجال ألوصلي، ويلاحظ في الشكل (6) تأثير زيادة V_{DS} على عرض منطقة الاستنزاف.إن زيادة عرض منطقة الاستنزاف سيعمل على تقليل عرض القناة التي يمر خلالها التيار من المنبع إلى المصرف وبذلك تكبر المقاومة التي يجب على التيار أن يواجهها عند ضرورة فيها وبالتالي فأنه من المتوقع أن يقل التيار I_D ،من جهة أخرى فان زيادة V_{DS} يفرض الزيادة في قيمة I_D ،وهكذا وبسبب تأثير فعلين يعملان بشكل مضاد لأحدهما للأخر ،نتيجة زيادة V_{DS} فأن التيار I_D يبقى ثابتا تقريبا انظر شكل (7).



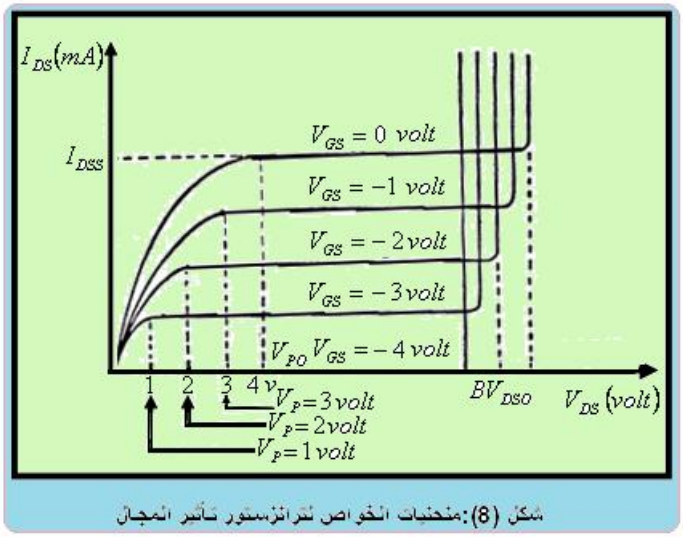
شكل(7): منحني الخواص لترانزستور تأثير المجال.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

من الجدير بالملاحظة في شكل (7) أن التيار I_D يثبت بعدما يصل الجهد V_{DS} إلى قيمة معينة تعرف بجهد الضيق-Punch Off Voltage ويرمز لها عادة ب V_P ويعرف بأنه جهد المصرف الذي يكون تيار المصرف بعده ثابتا تقريبا ، وعندما يساوي جهد المصرف V_{DS} جهد الضيق جهد V_P تصبح القناة ضيقة وتوشك طبقتا الاستنزاف على التلامس انظر شكل (6b).ومن الجدير بالذكر انه لا يمكن لعملية تضيق القناة أن تصل إلى حد غلق القناة لآن فرق الجهد الذي أدى إلى حدوث هذه الظاهرة سينعدم . كما يلاحظ من شكل (6) أن عرض طبقة الاستنزاف ليس متجانسا ،حيث إنها تكون عريضة من جهة المصرف وضيقة نوعا ما من جهة المنبع والسبب في ذلك إن جهد المصرف هو موجب بينما يكون المنبع عند الجهد الصفري وبالتالي فأن ثنائي المصرف – البوابة يكون منحازا عكسيا بصورة اكبر مما هو عليه الثنائي المنبع - البوابة.لابد أخيرا من القول إن لكل FET جهد الضيق V_P الخاص به كما هو الحال مع b بالنسبة للترانزستور الاعتيادي.

منحنيات الخواص للترانزستور المجال ألوصلي:

وتدعى أيضا بمنحنيات الإخراج وذلك لأنها تمثل العلاقة بين تيار الإخراج I_D مع جهد الإخراج V_{DS} عند قيم مختلفة لكنها ثابتة لجهد الإدخال (البوابة) V_{GS} ويبين الشكل (8) مجموعة من هذه المنحنيات.



شكل (8):منحنيات الخواص لترانزستور تأثير المجال

عند النظر إلى الشكل (8) يمكن ملاحظة النقاط التالية:

أولا: وجود ثلاث مناطق متميزة وهي:

أ- **المنطقة الأومية Ohmic Region:** وتسمى أيضا بالمنطقة الخطية وذلك لان مقاومة الترانزستور (القناة) تكون ثابتة في هذه المنطقة ومن ثم فأن تيار التوصيل I_D يزداد بزيادة الجهد V_{DS} عند ثبوت جهد البوابة V_{GS} في هذه المنطقة لا تستطيع منطقة الاستنزاف اختراق القناة بشكل كاف للتأثير على مقاومة القناة بشكل فاعل.مما يشير إلى تأثير V_{DS} يكون أقل فاعلية من V_{GS}.

ب- **منطقة الضيق Pinch-Off Region:** وتسمى أيضا بالمنطقة الفعالة Active Region ويكون التيار I_D في هذه المنطقة غير حساس بالنسبة للتغير في V_{DS}.ويلاحظ في هذه المنطقة وجود حالتين متميزتين هما:

١- **حالة قصر البوابة:** في هذه الحالة تكون $(V_{GS}=0\ volt)$ وبهذا فأن التيار I_D يكون مقاسا تحت شرط قصر البوابة ومكن ثم فأن قيمته تمثل أقصى قيمة لتيار المصرف ويرمز لها بالرمز (I_{DSS}).

٢- **حالة القطع:** وهي الحالة التي يكون فيها I_D مساويا للصفر أي عندما تتلامس طبقتا الاستنزاف بفعل من تسليط الجهد المعاكس V_{GS}.إن قيمة V_{GS} التي تولد حالة القطع يرمز لها بالرمز $(V_{GS(oFF)})$ تساوي دائما نفس قيمة ومقدار جهد الضيق أي أن:

$$|V_{GS(Off)}| = |V_P| \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

هذه العلاقة الصحيحة لجميع ترانزستورات تأثير المجال وفي استمارة المواصفات تعطى قيمة واحدة ل V_P أو تعطى قيمة ($V_{GS(oFF)}$).

ج-منطقة الانهيار التضاعفي Avalanche Breakdown Region:

ويلاحظ في هذه المنطقة أن التيار I_{DS} يزداد بشكل كبير لأي زيادة طفيفة في V_{DS}،شأنه شأن تيار الانهيار في الترانزستور الاعتيادي .ويسمى الجهد الذي يحدث عنده الانهيار (حدوث انكسار في منحنيات الخواص) بجهد الانهيار التضاعفي ويرمز له بالرمز (BV_{DS})،ويلاحظ أن قيمة هذا الجهد تقل (أي يظهر عند قيم أقل ل V_{DS})عند ازدياد V_{GS}،ولكن في الاتجاه السالب مما يشير إلى وجود علاقة بينهما وتكون من نوع:

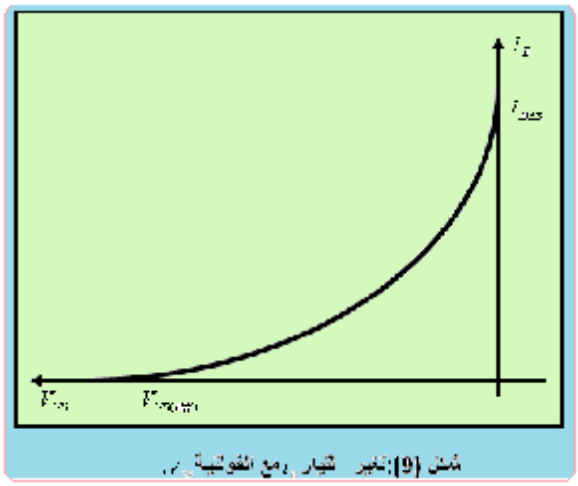
$$BV_{DS} = BV_{DSO} + V_{GS} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

حيث تمثل BV_{DSO} جهد الانهيار في حالة قصر البوابة.

ثانيا : يلاحظ على هذه المنحنيات أن قيمة V_P تقل هي الأخرى مع الزيادة السالبة ل V_{GS}،مما يشير أيضا إلى وجود علاقة بينهما من نفس العلاقة (2)أي ان:

$$V_P = V_{PO} + V_{GS} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

حيث تمثل V_{PO} جهد الضيق في حالة قصر البوابة.



شكل (9):تغير تيار دمع الفولتية ...

ثالثا: تظهر المنحنيات مزدحمة مع بعضها (قريبة من بعضها الآخر) عندما تقترب V_{GS} من قيمة V_P.ولكنها تتباعد عندما تقترب V_{GS} من الصفر مما يشير إلى أن التيار I_D دالة خطية ل V_{GS} عند ثبوت V_{DS}.وفي معظم ترانزستورات تأثير المجال يكون تغير I_D مع V_{GS} (قريبا من منطقة القطع) قطع مكافئ(انظر شكل (9)).

بحيث إن :

$$I_D \propto (V_P + V_{GS})^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

أو أن

$$I_D = I_{DSS}(1_P + \frac{V_{GS}}{V_P})^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

حيث أن هذه المعادلة تشير إلى أن $I_D = 0$ عندما تكون $V_P = V_{GS}$ ، وان I_D يكون مساويا ل I_{DSS} عندما يكون $V_{GS} = 0$وهذا ما وجدناه فعلا وعليه فأن المعادلة (5) تسمى بمعادلة تيار المصرف.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com