

Résumé de cours M1 Microélectronique
Module : Physique des composants semi-conducteurs 2

Transistor MESFET

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, Dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

Transistor MESFET

Définition d'un FET

Un transistor FET (**Field effet transistor**) est un dispositif unipolaire (conduction par électron , donc un FET à canal n; ou par trous ,donc un FET à canal p).

Il est constitué de **trois pôles** : **la source**, **le drain** et **la grille**.



Transistor MESFET

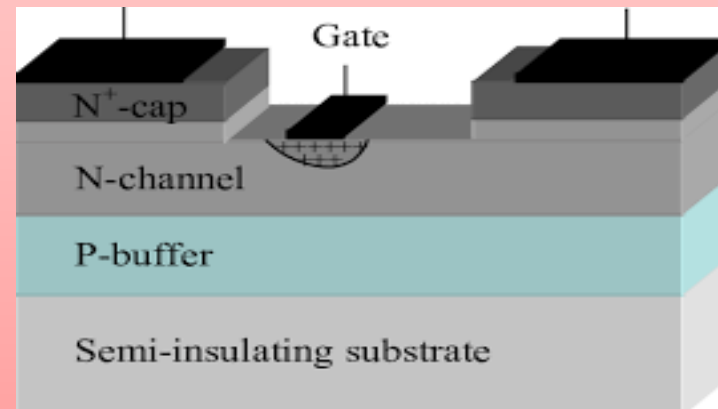
C'est quoi un MESFET?

MESFET = **M**etal **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor

Transistor à Effet de Champ Métal-Semiconducteur

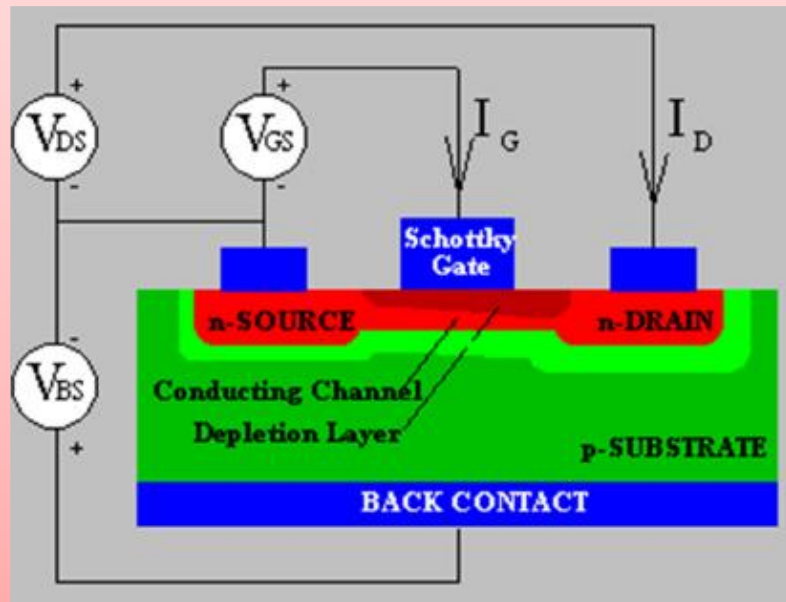
MESFET = Transistor dont le control du flux de porteurs est assuré par une diode Schottky.

Le contrôle du canal est obtenu en faisant varier la largeur de la couche de déplétion sous le contact métallique qui module l'épaisseur du canal et ainsi le courant.

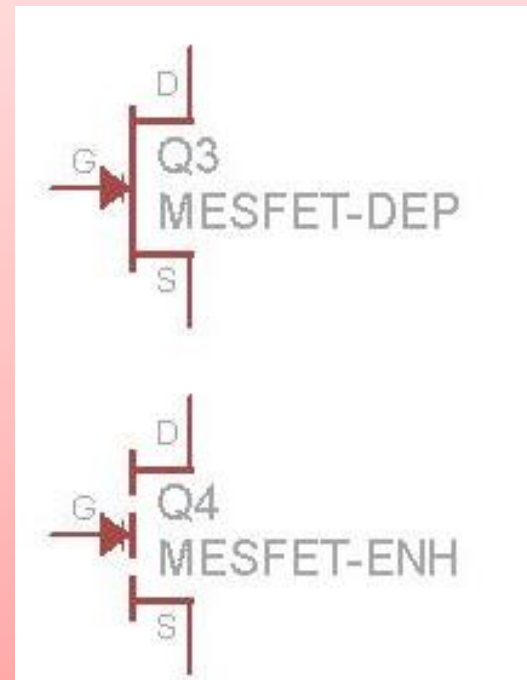


Transistor MESFET

Structure MESFET



Symboles MESFET

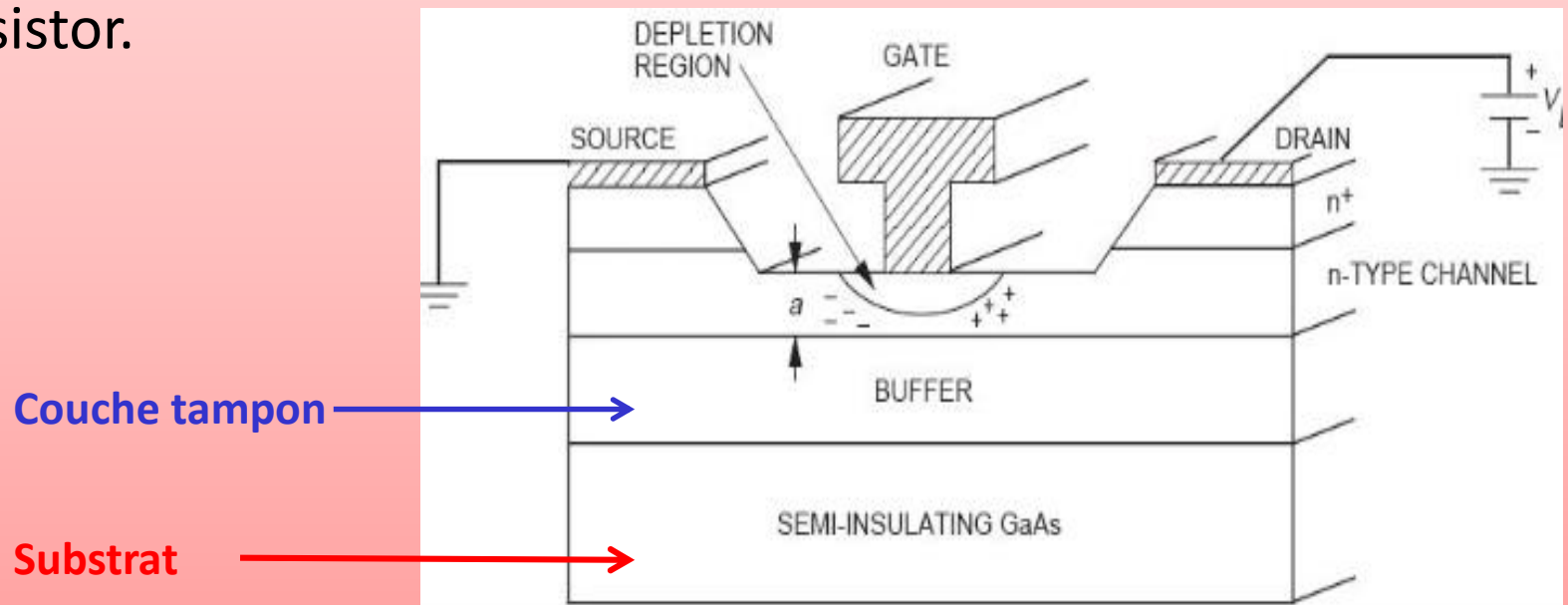


Transistor MESFET

Structure du MESFET

Le **matériau de base** sur lequel le transistor est fabriqué est un **substrat en GaAs** (GaAs non dopé : $'P' < 1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$).

Une **couche tampon** est développée par **croissance épitaxiale** sur le **substrat GaAs** pour isoler les défauts dans le substrat du transistor.



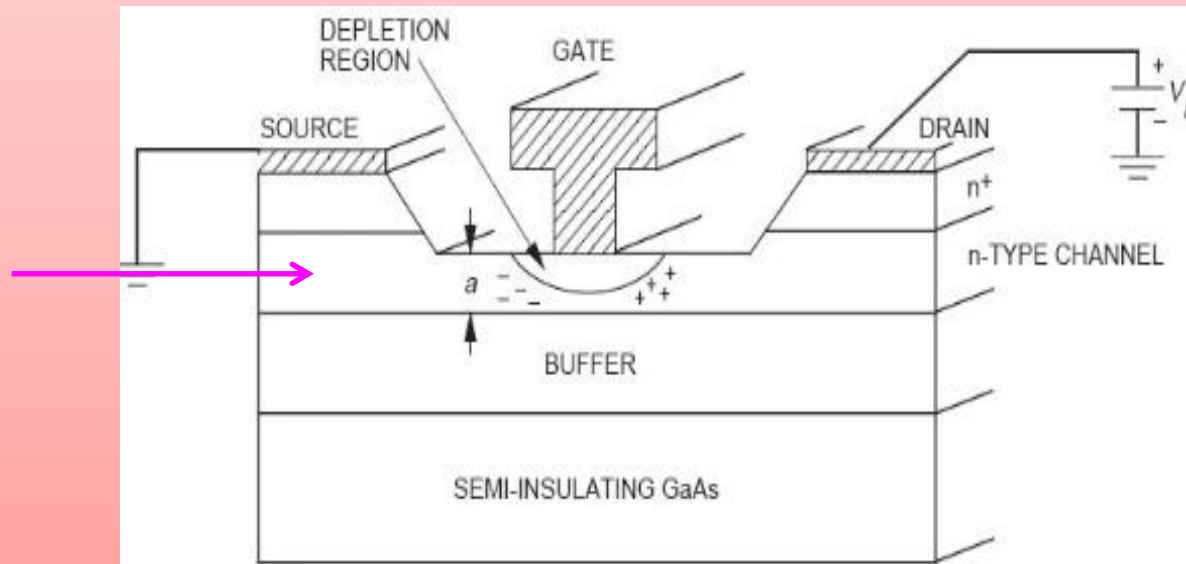
Transistor MESFET

Structure du MESFET (Suite)

Le canal ou la couche conductrice est une couche conductrice mince, légèrement dopée (n) à base d'un matériau semi-conducteur épitaxié sur la couche tampon (GaAlAs : $1.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 40 nm).

Comme la mobilité des électrons est environ 20 fois supérieure à celle des trous dans GaAs, le canal conducteur est toujours de type n pour les transistors micro-ondes.

Canal

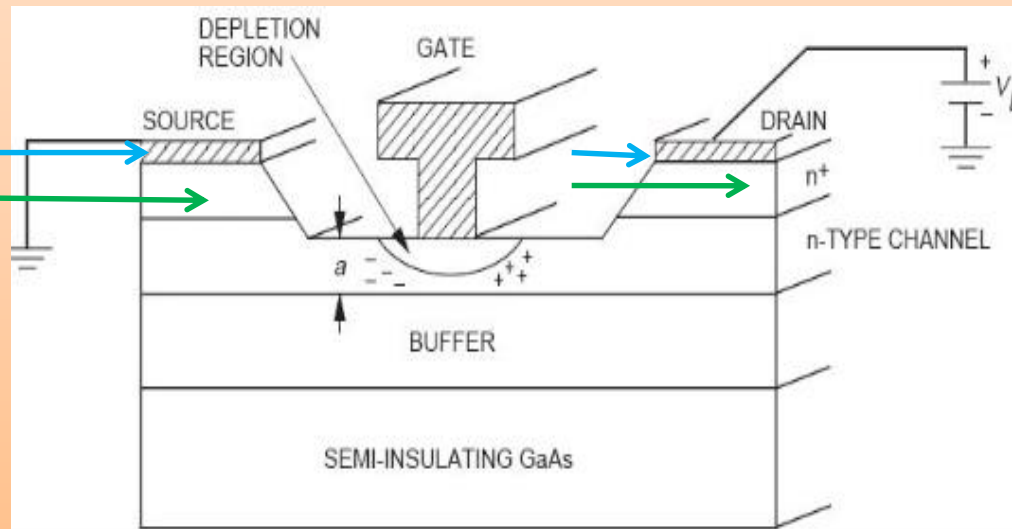


Données Pour un MESFET

Structure du MESFET (suite)

Deux **couches hautement dopées** (n^+) ($\text{GaAs } N^+ : 2.0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) sont déposée en **surface des deux côtés de la région du canal** pour aider à la fabrication de **contacts ohmiques** à faible résistance au transistor.

Deux **contacts ohmiques**, la source et le drain, sont fabriqués sur **les deux couches très dopée** pour permettre l'accès au circuit externe.



Contacts ohmiques

Couches hautement dopées

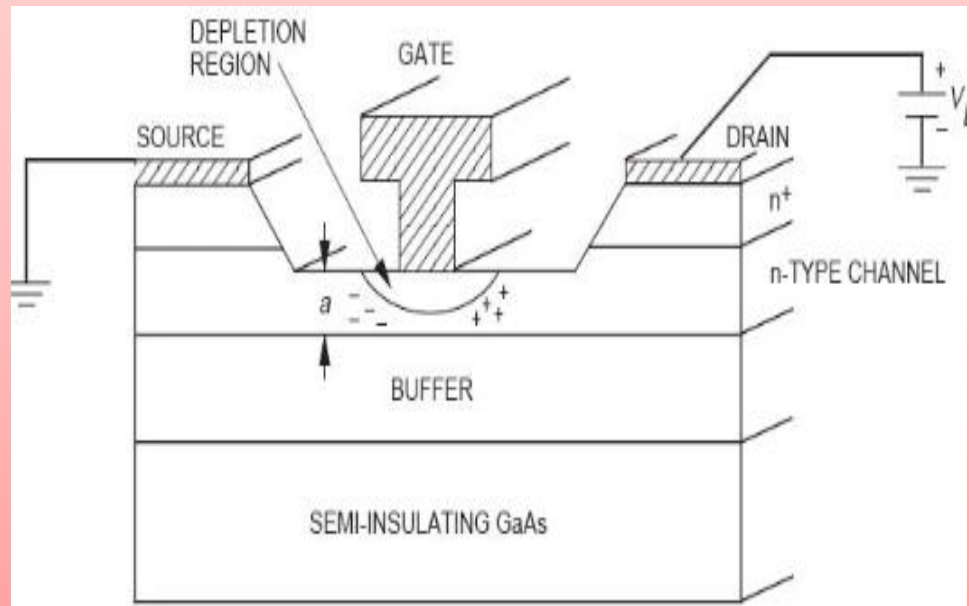
N.B.: En réalité, les deux couches hautement dopées ont été une seule couche sur toute la surface, sauf que la région du canal a été gravée.

Données Pour un MESFET

Structure du MESFET

Entre les deux contacts ohmiques, un contact redresseur ou Schottky est fabriqué (dépôt d'un métal=grille)

Typiquement, les contacts ohmiques sont à base de **Au-Ge** et le contact Schottky est **Ti-Pt-Au**.



Fonctionnement du MESFET

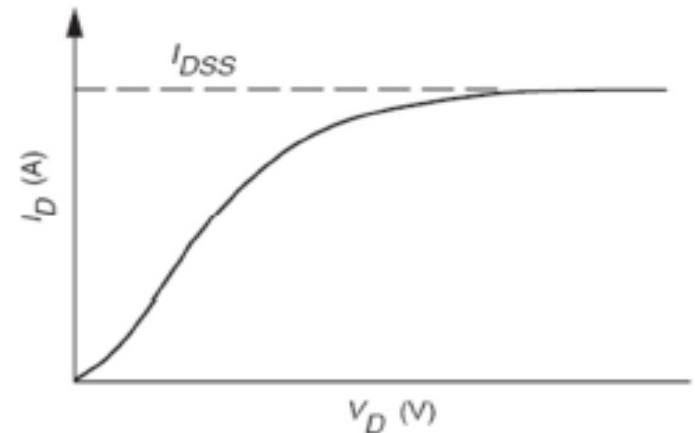
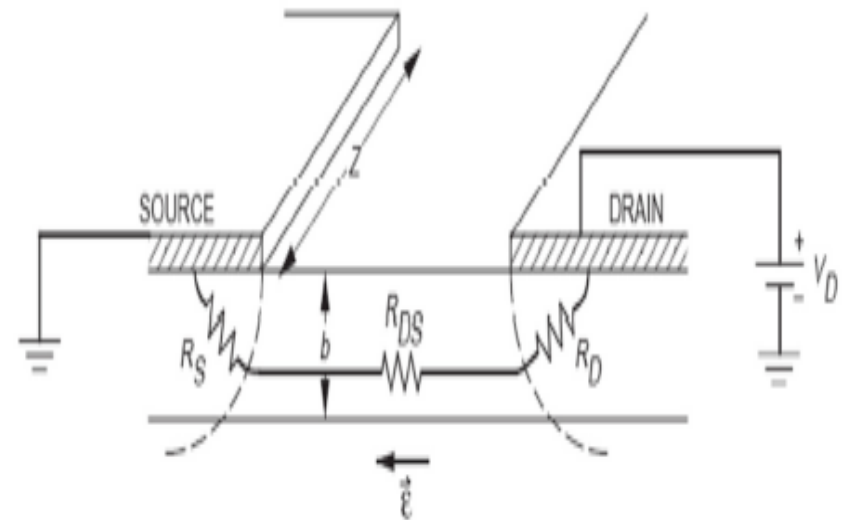
Fonctionnement du MESFET (sans grille)

Le **fonctionnement** de base du **MESFET** est facilement compris en considérant d'abord **les caractéristiques I-V** du dispositif **sans le contact de la grille**.

Si une **petite tension** est appliquée entre **la source et le drain**, un courant circulera entre les deux contacts.

$$I_D = \frac{V_D}{R_D + R_S + R_{DS}}$$

Lorsque **la tension augmente**, le courant **augmente linéairement** avec une résistance associée qui est la somme des deux résistances ohmiques, **R_S** et **R_D** , et la résistance du canal **R_{DS}** .



Fonctionnement du MESFET

Fonctionnement du MESFET sans grille(suite)

Si la **tension est encore augmentée**, le champ électrique appliqué **deviendra plus grand** que le champ électrique **requis pour la saturation** de la **vitesse électronique**.

Sous une **polarisation importante**, une **expression alternative pour le courant I_D** est à **établir**. cette expression relie le courant directement aux paramètres du canal:

$$I_D = Q(x)v(x) = Zb(x)qn(x)v(x)$$

Fonctionnement du MESFET

Fonctionnement en présence de la grille avec $V_G = 0$

Une région de déplétion formée sous l'électrode de grille réduit la profondeur effective du canal, $b(x)$, et augmente donc la résistance à l'écoulement du courant sous la grille.

La profondeur de la région de déplétion dépend de la chute de tension à travers la jonction Schottky.

Puisque le courant circulant dans le canal équivaut à un flux de courant à travers une résistance distribuée, il y a une grande chute de tension à travers l'extrémité du drain côté canal qu'à la fin de la source.

Il en résulte que la profondeur de la région de déplétion est plus grande sur l'extrémité du drain côté canal.

Fonctionnement du MESFET

Fonctionnement en présence de la grille avec $V_G = 0$

La profondeur **non uniforme** du canal a **deux effets** sur le fonctionnement du composant.

Tout d'abord, il y a une **accumulation d'électrons** du côté de **la source** et une **diminution des électrons** sur **le drain** du côté de la région de déplétion.

Ce **dipôle de charge** crée une **capacité de rétroaction** entre **le drain** et **le canal** généralement appelé C_{DC} .

Le **deuxième effet** est que le champ électrique **dû au dipôle** s'ajoute au **champ électrique appliqué** provoquant la condition de **saturation** à se produire à plus faible V_D .

Fonctionnement du MESFET

Fonctionnement en présence de la grille ($V_G \neq 0$)

En polarisant la jonction de la grille, la profondeur de la zone de déplétion et donc la résistance au courant entre la source et le drain et le courant de saturation peuvent être contrôlés.

Si une polarisation négative assez importante est appliquée, la profondeur de la zone de déplétion sera égale à la profondeur du canal où le canal sera pincé.

Cette polarisation de la grille est appelée la tension de pincement et est donnée par:

a: profondeur du canal (l'épaisseur de la région dopée du canal).

$$V_P = \left(\frac{qN_d}{2\epsilon_0\epsilon_r} \right) a^2$$

Fonctionnement du MESFET

Fonctionnement en présence de la grille ($V_G \neq 0$)

Sous des **conditions de pincement**, le courant de drain **chute** à une très petite valeur.

Par conséquent, **le transistor** peut agir comme une **résistance contrôlée** par **la tension** ou un **interrupteur**.

Fonctionnement du MESFET

Fonctionnement en présence de la grille ($V_G \neq 0$)

La caractéristique la plus importante du MESFET est qu'il peut être utilisé pour augmenter le niveau de puissance d'un signal micro-onde, ou qu'il fournit un gain.

Puisque le courant de drain peut être fait varier beaucoup en introduisant de petites variations du potentiel de grille, le MESFET peut être modélisé comme source de courant contrôlée par une tension, la transconductance du MESFET est définie comme:

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

Fonctionnement du MESFET

Fonctionnement en présence de la grille

En utilisant des approximations à canal court, on peut montrer que la transconductance est donnée par:

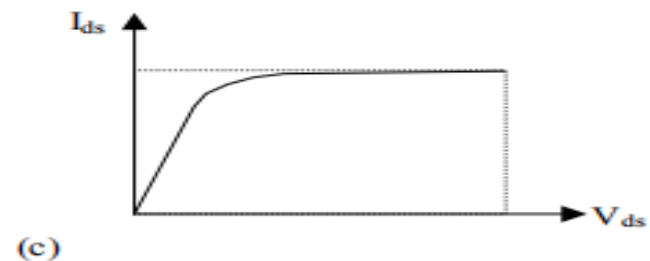
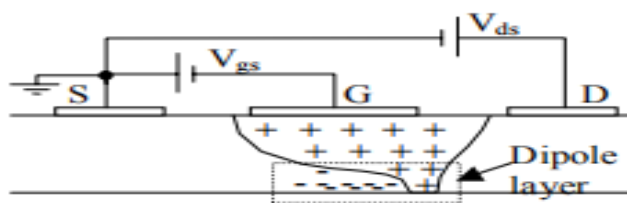
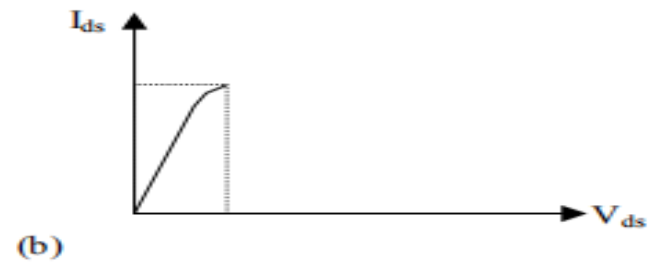
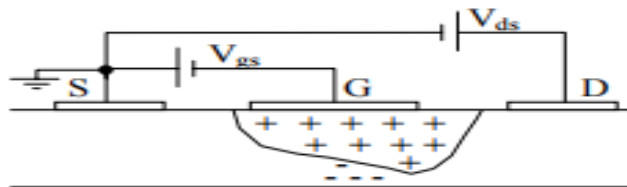
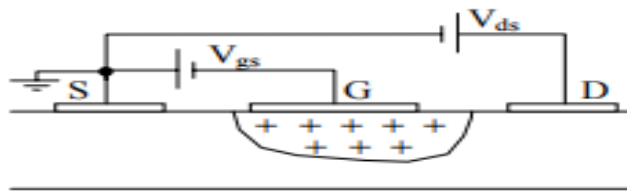
$$g_m = \frac{I_S}{2V_P} \left(\frac{I_S}{I_S - I_D} \right)$$

où I_S est le courant maximal qui peut circuler si le canal était entièrement non appauvri dans des conditions de vitesse saturée.

Puisque I_S est proportionnel à la profondeur du canal a , et V_P est proportionnel au carré de la profondeur du canal, g_m est inversement proportionnel à la profondeur du canal.

En outre, notons que pour les grands I_S et g_m , les résistances parasites R_S et R_D doivent être minimisés (dopage).

Fonctionnement du MESFET



Fonctionnement du MESFET

Paramètres d'un MESFET

Les paramètres qui caractérisent un MESFET pour une application HF sont:

- Le produit gain - bande passante;
- La fréquence d'oscillation f_{max} ;
- La fréquence f_t pour laquelle le gain de puissance=1.

Fonctionnement du MESFET

Fréquences f_t et f_{\max}

Si on se place dans le cadre des approximations du canal court, la fréquence f_t peut être liée au temps de transit, τ , des électrons à travers le canal par l'expression:

$$f_t = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{v_{sat}}{2\pi L}$$

Où v_{sat} est la vitesse de saturation $\approx 2 \times 10^5$ m / s pour GaAs,

La fréquence f_{\max} peut être approchée par:

$$f_{\max} = \frac{f_t}{2} \sqrt{\frac{R_{DS}}{R_G}}$$

Où R_G est la résistance de la grille

Fonctionnement du MESFET

Condition sur la longueur du canal

- ❑ Pour les niveaux de dopage généralement utilisés dans le canal, la longueur de la grille doit être inférieur à $1 \mu\text{m}$ pour que f_t soit supérieur à 10 GHz.
- ❑ Vu les limites de la fabrication et la nécessité de garder le champ électrique dans le canal moins que le champ critique qui conduit à l'avalanche; il faut maintenir la limite inférieure de L à environ $0,1 \mu\text{m}$,

Fonctionnement du MESFET

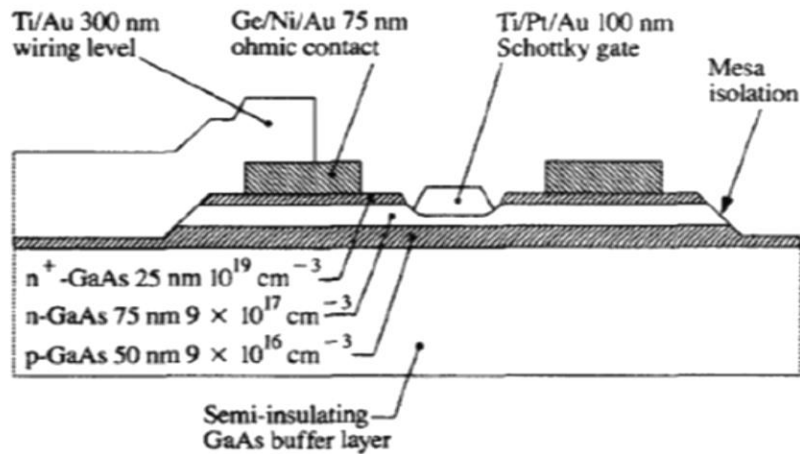
Condition sur la profondeur du canal

Pour que la grille puisse avoir un control effective sur le courant du canal, **la longueur du canal L** et sa **profondeur a** doivent vérifier la condition **$L/a > 1$**

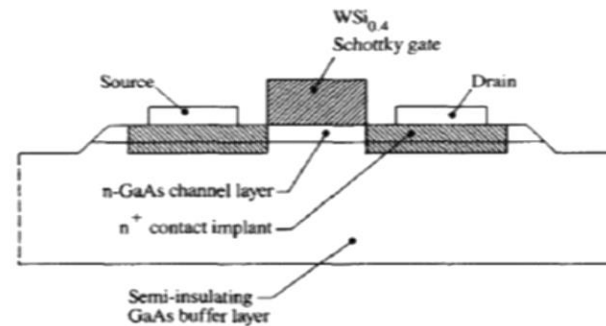
Cette condition nécessite **une profondeur de canal** de l'ordre de **$0,05$ à $0,3 \mu\text{m}$** pour la plupart des **MESFET à base de GaAs**.

La **faible profondeur du canal** nécessite que la **concentration des porteurs** dans le canal soit aussi **élevée que possible** pour maintenir un courant élevé.

Données Pour un MESFET à Base de GaAs



GaAs MESFET cross section.

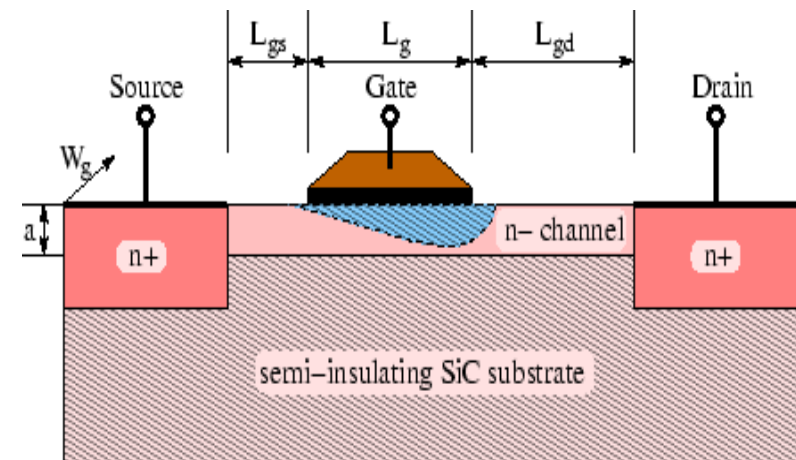


Self-aligned GaAs MESFET cross section.

Données Pour un MESFET à Base de SiC

Optimized device parameters for a 4H-SiC MESFET.

parameter	value
gate length L_g	$0.5 \mu\text{m}$
gate width W_g	1 mm
source-drain spacing $L_{gs} + L_g + L_{gd}$	$2 \mu\text{m}$
channel doping N_d	$5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
channel thickness a	$0.15 \mu\text{m}$



Avantages, inconvénients et application du MESFET

L'avantage principal du MESFET par rapport au MOSFET est due à la plus grande mobilité des porteurs de charge dans le canal;

L'inconvénient de la structure MESFET est la présence de la grille métallique Schottky qui limite la tension de polarisation directe sur la grille pour activer la diode Schottky;

Cette tension d'activation est typiquement de 0,7 V pour les diodes Schottky à base de GaAs;

La tension de seuil doit donc être inférieure à cette tension d'activation;

Conséquence: Il est plus difficile de fabriquer des circuits contenant un grand nombre de MESFET en mode amélioration;

Avantages, inconvénients et application du MESFET

- La fréquence de transit plus élevée du MESFET le rend particulièrement intéressant pour les circuits micro-ondes;
- En général, les MESFETs en mode de déplétion sont les plus utilisés puisqu'ils fournissent un courant plus grand et une plus grande transconductance;
- Le fait que le canal est enterré donne également un meilleur rapport signal/bruit car le piégeage et la libération des porteurs de charge par et à partir des états de surface et des défauts sont éliminés.

Avantages de l'utilisation du GaAs sur Si

L'utilisation de MESFETs à base de GaAs plutôt que de MESFETs à base de Si offre deux principaux avantages :

- La mobilité des porteurs de charge à la température ambiante est plus de 5 fois plus grande, tandis que la vitesse de saturation est environ deux fois celles du silicium.
- Il est possible de fabriquer des substrats de GaAs semi-isolants, ce qui élimine le problème de l'absorption de la puissance micro-onde dans le substrat en raison de l'absorption par les porteurs de charge libres.

Applications et Matériaux

Applications du MESFET

Appareils à haute fréquence: téléphones cellulaires, récepteurs des satellites, radar, appareils à micro-ondes.

Remarque:

Le GaAs est le matériau de choix pour les MESFETs, car il a une grande mobilité électrique.

Il est à noter que:

si $f > 2$ GHz: On utilise les MESFETs à base de GaAs;

Si $f < 2$ GHz: On utilise plutôt les MESFETs à base de Si.

Comparaison MOSFET-MESFET

MOSFET	MESFET
La grille est contrôlée par la barrière MOS (Tension seuil)	La grille est contrôlée par la barrière Schottky
Les MOSFETs sont généralement fabriqué en Silicium .	Les MESFETs sont généralement fabriqué en GaAs .
Le MOSFET est généralement dans l'état OFF , le courant circule uniquement lorsque le canal passe en régime d'inversion sous l'effet de la polarisation de la grille	Le MESFET est généralement dans l'état ON , Une polarisation négative de la grille est nécessaire pour faire passer le MESFET dans l'état OFF .
Les transistors MOSFETs à canal-n et à canal-p existent et donnent lieu à la technologie CMOS .	On s'intéresse plutôt aux MESFETs type n
Le MOSFET est plutôt utilisé dans les circuits intégrés, son utilisation en micro-ondes n'est pas encore au point.	Le MESFET est plus utilisé dans les appareils à micro-ondes , son utilisation dans les circuits intégrés n'a pas atteint le niveau du MOSFET.

Pour plus de détail, se référer au livre :

Henry Mathieu Hervé Fanet

« Physique des semiconducteurs et des composants, électroniques »

Editeur: Dunod