

**Détection de rayonnements
à très basse température**

5e école thématique du 2 au 8 juin 2002

Vers l'électronique à 4,2K par le HEMT

**Réalisation et
Caractérisation**

Y. JIN

Oléron

**Vers l'électronique à 4,2K par le HEMT :
Réalisation et Caractérisation**

Yong JIN

e-mail yong.jin@LPN.cnrs.fr

Laboratoire de Photonique et de Nanostructures

(UPR20)-CNRS

Route de Nozay, 91460 Marcoussis

Sommaire

Introduction

Densité électronique dans un semiconducteur et température

Transistors valables à très basses températures

Choix du HEMT

Critères de performances

Réalisation

Moyens techniques disponibles au LPN

Définition et transfert de motifs par la lithographie

Différentes étapes pour réaliser le HEMT

Caractérisation

Paramètres continus et paramètres de bruits

Effet de température

Effet de polarisation électrique pendant le cycle thermique

Résultats à 4,2K

Bruit $1/f$ et paramètres continus à 4,2K

Performances obtenues

Conclusions et Perspectives

Introduction

A basses températures $\leq 4,2\text{K}$, les transistors ayant un faible niveau de bruit à basse fréquence et un faible niveau de consommation, actuellement absents, sont un objet de recherche dans le domaine de la microélectronique, depuis plusieurs décennies. En effet, ces dispositifs sont indispensables pour les préamplificateurs des détecteurs dans l'astrophysique, la physique nucléaire et la physique à basses températures. Il faut souligner que la cryoélectronique au-dessous de 77K est aussi un défi pour la NASA dans la conquête spatiale.

Pour atteindre l'objectif, de nombreux laboratoires de recherche dans le monde ont étudié différents types de transistor, notamment JFET, MESFET et MOSFET. C'est à la demande de collègues travaillant dans le domaine de détection à très basses températures que nous avons entamé et mené une investigation pour cet objectif par le HEMT. En effet, le HEMT est basé sur un gaz d'électrons bidimensionnel ; du point de vue intrinsèque, ce genre de dispositif est le plus adapté pour la cryoélectronique. Au UPR20, nous possédons les moyens dans la réalisation des structures d'hétérojonction, la nano et microfabrication, et surtout nous avons acquis le savoir-faire pour les dispositifs du type HEMT depuis de nombreuses années. Notre point fort est, d'une manière intégrale, d'avoir la conception, la réalisation et l'amélioration technologique et la caractérisation.

Nous organisons ce cours en quatre parties : tout d'abord nous allons exposer, en nous basant sur la conception de base de semiconducteur, pourquoi nous avons choisi le HEMT pour l'électronique à $4,2\text{K}$ et les critères pour une telle application ; ensuite, nous signalerons les moyens et les étapes nécessaires pour la réalisation de ce type de transistor ; après avoir défini divers paramètres continus et paramètres de bruits, nous présenterons les caractéristiques de HEMT en fonction de la température et les résultats à $4,2\text{K}$, nous montrerons également notre développement sur la relation entre le bruit $1/f$ et les paramètres continus ainsi que la vérification expérimentale ; enfin, nous résumerons les performances obtenues dans les HEMTs étudiés et présenterons la perspective d'un HEMT ayant un bruit $1/f$ au-dessous de $1\text{nV}(\text{Hz})^{-1/2}$ à partir de l'ordre de kilo Hertz avec une puissance de dissipation de quelques dizaines de micro Watt à $4,2\text{K}$.

Densité électronique dans un semiconducteur et température

Dans le cas d'un semiconducteur intrinsèque, la densité électronique en fonction de la température peut s'exprimer par :

$$n_i(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{2k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} (m_c m_v)^{3/4} e^{-E_g/2K_B T}$$

E_g est le « band gap ». Pour le silicium E_g est de 1,12eV. De 300K à 4K, le facteur $e^{-E_g/2K_B T}$ diminue de e^{1600} fois !

Dans le cas d'un semiconducteur extrinsèque non dégénéré, la densité électronique à suffisamment basse température est :

$$n_c(T) = \frac{N_c (N_d - N_a)}{N_a} e^{-(\epsilon_c - \epsilon_d)/2K_B T}$$

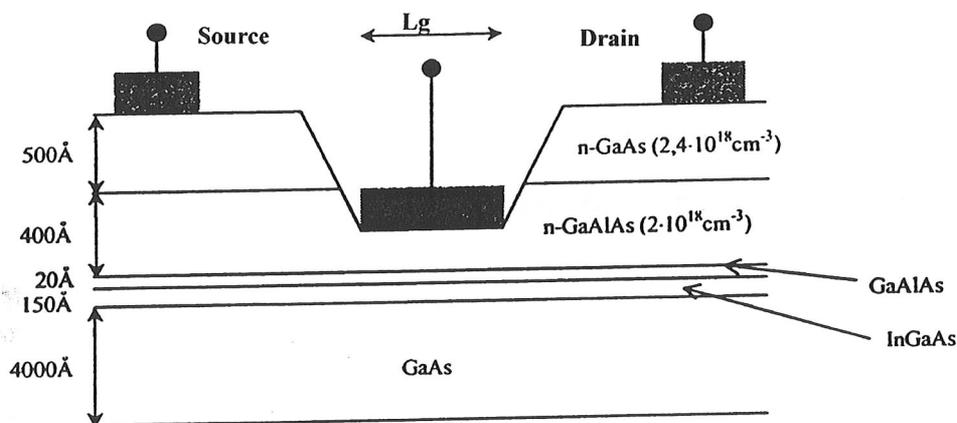
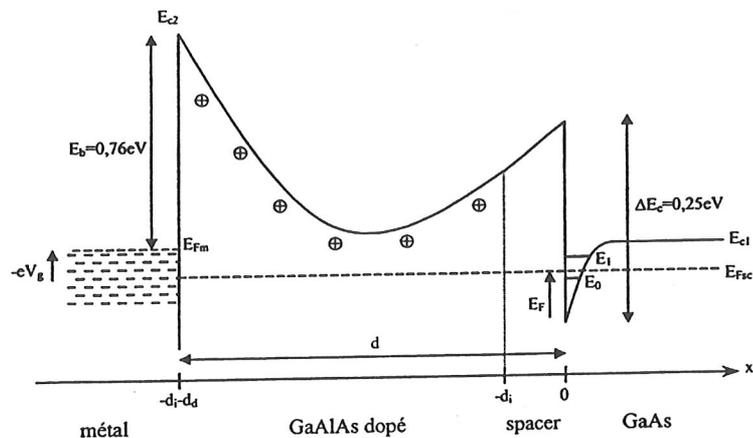
$\epsilon_c - \epsilon_d$ est le niveau de donneur par rapport à la bande de conduction. Dans le cas de silicium, si le donneur est de l'As, $\epsilon_c - \epsilon_d = 49\text{meV}$, le terme $e^{-(\epsilon_c - \epsilon_d)/2K_B T}$ devient 10^{-29} à 4,2K. Ce résultat montre que les dispositifs basés sur une structure dite « bulk » comme JFET en silicium, ne peut pas fonctionner à très basse température.

Transistors valables à très basse température

Les transistors pouvant fonctionner à très basse température sont donc basés sur une structure d'un gaz d'électrons bidimensionnel, et actuellement il y a des MOSFETs et des transistors du type HEMT en matériaux III-V comme AlGaAs/GaAs ou Si-Ge. Pour le cas de Si-Ge, certains problèmes liés aux matériaux restent encore à résoudre.

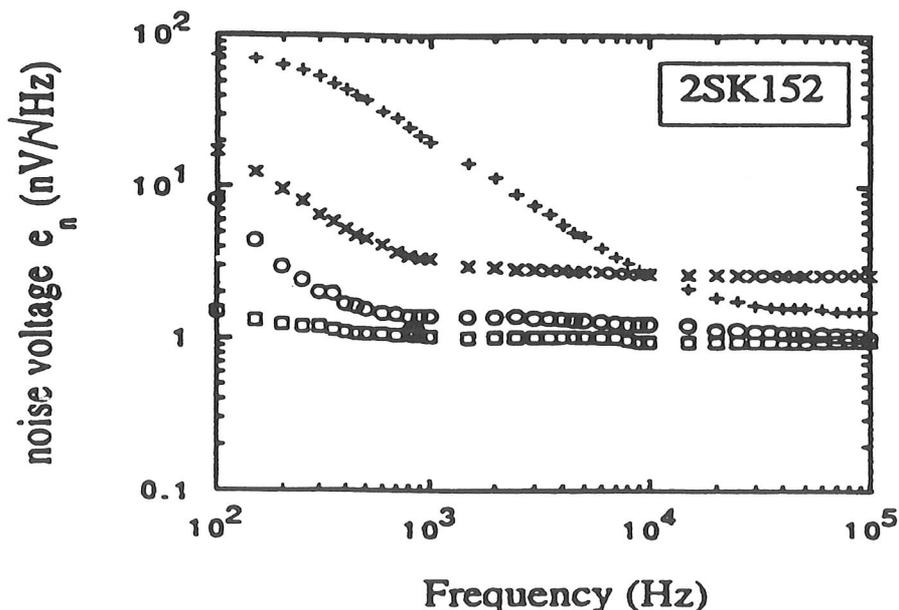
Choix du HEMT

Par rapport au MOSFET, le HEMT présente une meilleure qualité à l'interface où réside le gaz d'électrons bidimensionnel. Dans le cas de MOSFET, cette interface consiste en une couche oxydée et en une couche de semiconducteur. Pour le HEMT, l'interface est constituée par exemple de AlGaAs/GaAs qui est obtenue par l'épitaxie par jets moléculaires avec une densité d'impureté entre 10^{14} et $10^{15}/\text{cm}^3$. Nous décrivons l'obtention d'un gaz d'électrons bidimensionnel par le diagramme de bande de cette structure et le fonctionnement du HEMT. Il faut signaler que dans le cas de AlGaAs/GaAs, la mobilité électronique est de l'ordre de $5 \cdot 10^3 \text{cm}^2/\text{Vs}$ à 300K et qui peut être supérieure à $10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ à 4,2K. En ce qui concerne la densité du gaz d'électrons bidimensionnel, nous avons observé qu'entre 300K et 4,2K la diminution est seulement de 50% dans certains cas.



Critères de performances

Le critère en bruit $1/f$ pour le transistor à réaliser est imposé par la performance du JFET en silicium avec un niveau de bruit équivalent à l'entrée de $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 1 kHz mais qui ne fonctionne qu'à une température supérieure à 100 K .



JFET Commercial, $T \geq 100 \text{ K}$, $P = 40 \text{ mW}$, Caractérisé par F. Ayela et al, Rev. Sci. Instrum. 62 (11), 1991, CRTBT, France

Réalisation

La microélectronique avancée nécessite de plus en plus des moyens modernes : une salle blanche pour éviter toutes contaminations pendant toutes les étapes de fabrication, des matériaux très purs, de plus, la lithographie optique ou électronique, la gravure chimique ou ionique, le dépôt de métaux et diélectriques, le montage des dispositifs fonctionnels dans des boîtes et la caractérisation. Comme exemple :

Moyens techniques disponibles au LPN

Salle blanche : 700M²

Epitaxie semiconducteurs III-V : jets moléculaires, organométalliques InGaAsP/InP, GaAlAs/GaAs

Lithographie : optique, masqueur électronique, ions, rayons X

Gravure : ionique, ionique réactive, ionique chimiquement assistée

Dépôts de métaux : Au, Ni, Co, Pt, Ti, W, Nb, ...Dépôts diélectriques : SiC, Si₃N₄, SiO₂, Al₂O₃, ...

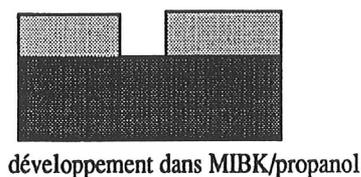
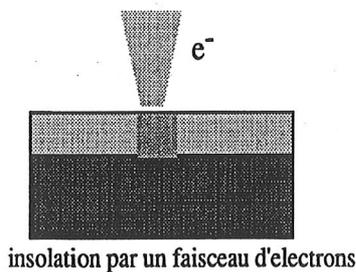
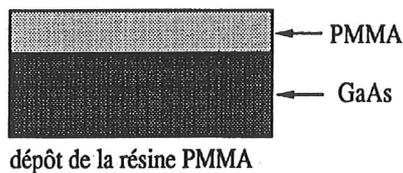
Analyses : Microscopie à balayage ou en transmission, rayons X, mesures dimensionnelles

Caractérisation en transport électrique : cryostat de 300K à <4,2K, cryostat dilution avec champ magnétique, effet Hall, I-V, C(V), Spectre de bruit, ...

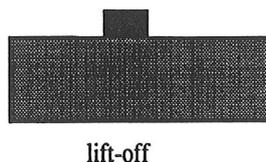
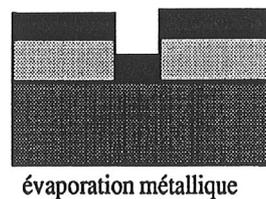
Définition et transfert de motifs par la lithographie

La lithographie en UV ou en faisceau d'électrons est une étape de base dans la microélectronique, c'est par cette technique qu'on réalise des dispositifs avec les fonctionnalités les plus complexes. Tout d'abord, on dépose une fine couche de résine, en générale organique, sur la surface de semiconducteur, ensuite la résine subit une exposition soit sous UV à l'aide d'un masque optique ou soit sous un faisceau d'électrons par une « écriture » directe. Les parties ayant subi une exposition sont dissoutes dans un développeur (pour des résines dites positives), on obtient donc des motifs dans la résine. Ensuite on peut les transférer sur la surface non protégée par la résine de semiconducteur, par exemple, des motifs métalliques par une évaporation ou « tailler » la surface de semiconducteur par une gravure chimique ou ionique. Après avoir réalisé la déposition de métaux ou l'enlèvement de matière, on dissout la résine et on obtient les motifs voulus. Pour fabriquer un dispositif fonctionnel, il faut répéter plusieurs fois cette procédure.

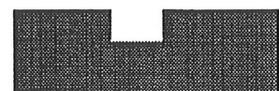
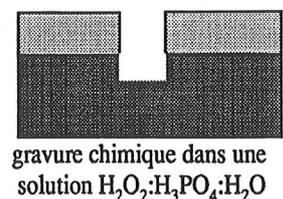
définir un motif dans une résine (PMMA, AZ.....)



réaliser un motif par déposition (évapo., électroly...)



réaliser un motif par gravure (ionique, chimique...)



Différentes étapes pour réaliser le HEMT

La réalisation d'un HEMT (par la lithographie en faisceau d'électrons) consiste en six principales étapes techniques, accompagnées de cinq niveaux de lithographie :

a) Définir tout d'abord au moins deux croix d'alignement suffisamment séparées pour pouvoir corriger la rotation et le décalage entre les différentes étapes de lithographie. Il faut souligner qu'en réalité il y a beaucoup plus que deux croix d'alignement car au fur et à mesure les croix peuvent être endommagées par les étapes de métallisation.

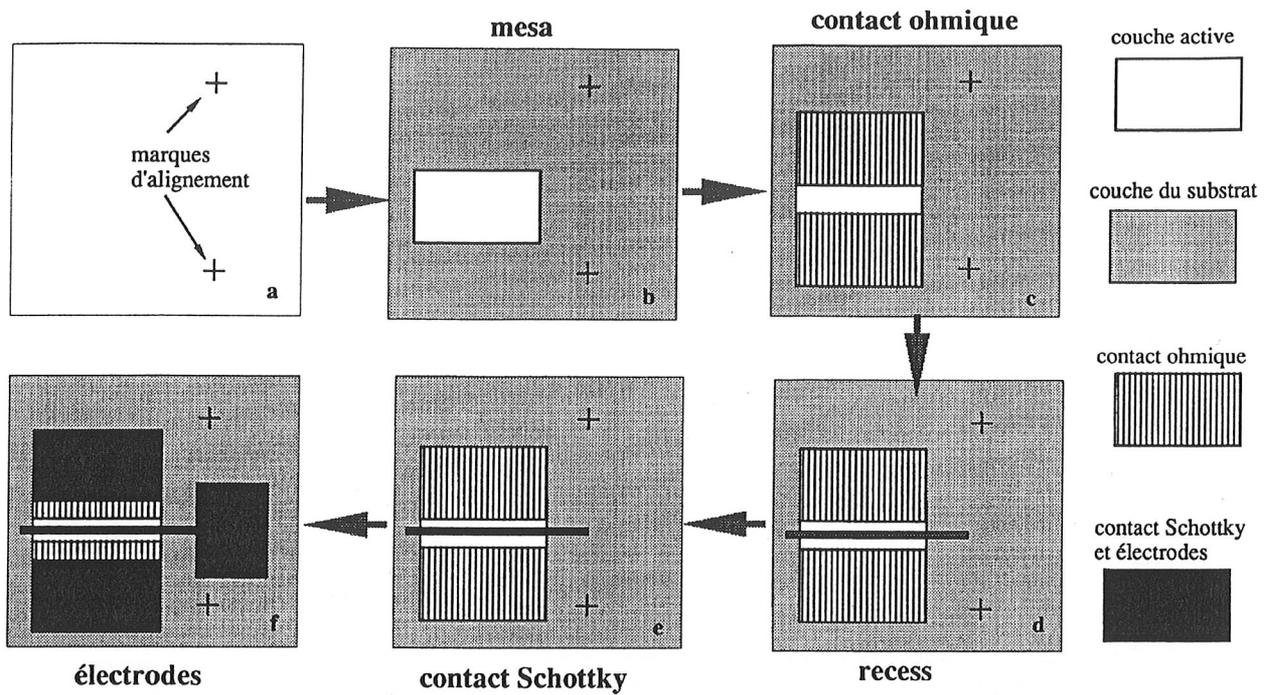
b) L'étape dite « mesa » est de définir la zone active où il y a le gaz d'électrons et d'isoler cette zone du reste de la surface par une gravure chimique, $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}$.

c) Former la source et le drain par le contact ohmique, ceci est réalisé par la diffusion de Ge^+ à l'aide d'une alliage eutectique de l' AuGe après un recuit rapide d'environ de 400°C et de l'ordre de 30 secondes.

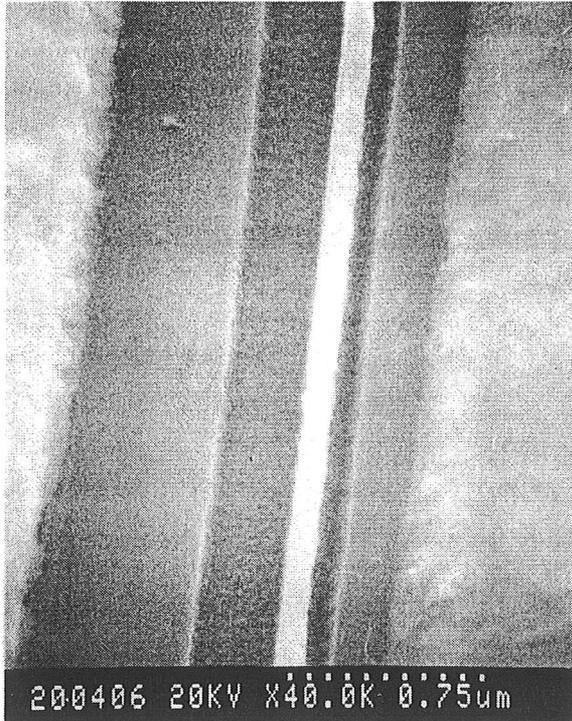
d) Le « recess » ou la gravure dans la réalisation de grille est l'étape la plus délicate. En effet, c'est la profondeur de gravure qui détermine la densité électronique initiale du futur transistor. Dans une certaine structure d'hétérojonction et pour une densité électronique souhaitée, un angström de variation peut induire une différence de dix pour cent dans la densité électronique.

e) Après le « recess », la grille métallique est obtenue par le dépôt de métaux, en général du Ti pour obtenir un contact du type Schottky, suivi par l'Au pour réduire la résistance.

f) Enfin, les plots sont déposés avec une métallisation relativement épaisse de l'Au pour réaliser des électrodes. Ces électrodes seront utilisées pour des mesures sous points ou des connexions électriques par le « bonding ».



Exemple de réalisation



Cette photo est utilisée pour illustrer la zone active du HEMT : la morphologie de l'alliage eutectique de l'AuGe, la gravure chimique autour de la grille et la grille métallique. Une autre particularité de ce HEMT destiné à l'étude en hyper fréquence avec une longueur de grille de 150nm, est d'être en double « recess » : ce processus a besoin de deux niveaux de lithographie électronique, la précision d'alignement de la grille entre le deuxième « recess » et le premier « recess » est supérieure à 50nm.

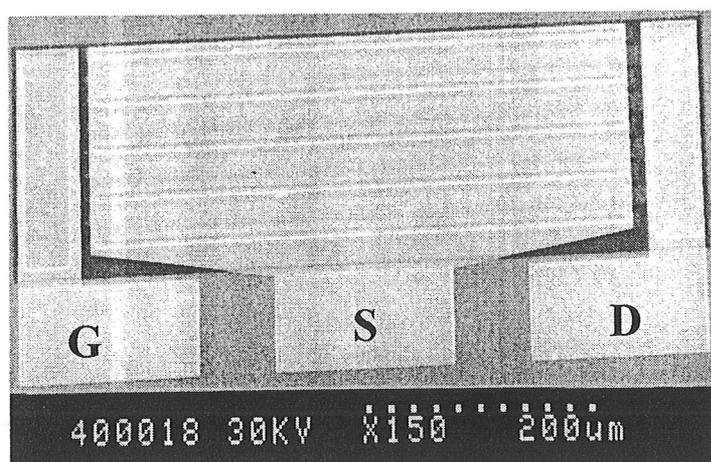
HEMT à caractériser

Dans le cas de l'hétérostructure conventionnelle AlGaAs/GaAs, la concentration d'Aluminium est d'environ 30% pour obtenir une discontinuité suffisante entre les bandes de conduction et pour former le gaz d'électrons bidimensionnel. Mais cette concentration d'Aluminium engendre des centres DX qui vont piéger des électrons à basses températures. Cependant, lorsque la concentration d'Aluminium est d'environ 20%, les centres DX peuvent être évités. C'est pour cette raison que nous avons utilisé une structure d'hétérojonction pseudomorphique $Al_xGa_{1-x}As/InGaAs$ avec une concentration d'Aluminium de 22%. Diverses configurations géométriques de transistor ont été réalisées avec des longueurs et largeurs de grille de $14\mu m \times 3mm$, $4\mu m \times 4mm$, $1\mu m \times 2mm$ et $1\mu m \times 4mm$.

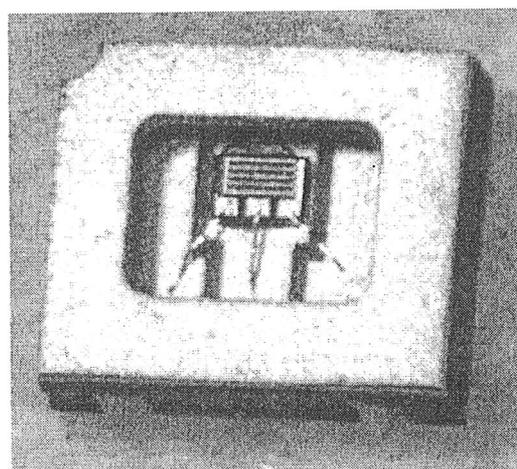
STRUCTURE :

	THICKNESS (Å)	DOPANT CONC.(cm-3)*	ALUMINUM OR INDIUM CONTENT
GaAs : Si	200	3.5 E18	0
AlGaAs : Si	450	2.0 E18	0.22
AlGaAs undoped	40	--	0.22
InGaAs undoped	170	--	0.15
GaAs undoped	500	--	0
AlGaAs undoped 150Å 10x----- GaAs undoped 50Å	2000	--	0/0.22
GaAs undoped	2000	--	0
Semi-insulating substrate			

La structure de l'hétérojonction pseudomorphique AlGaAs/InGaAs utilisée



HEMT avec multiples canaux en parallèles avec une longueur de grille de $1\mu m$ et une largeur de grille de $2mm$ ou $4mm$. La surface totale de transistor est de $700\mu m$ par $500\mu m$



HEMT monté par la méthode de « bonding » avec un fil d'Al ou d'Au d'environ $20\mu m$ dans un boîtier céramique du type SOT23

Caractérisation

Paramètres continus

Le paramètre de transconductance g_m est un critère très utilisé pour mesurer l'efficacité de contrôle de courant entre la source et le drain I_{ds} d'un transistor à effet de champ (FET : Field Effect Transistor) par la tension de grille V_{gs} à une tension de drain constant V_{ds} . La conductance de sortie g_d est définie par le rapport de la variation I_{ds} sur V_{ds} avec une V_{gs} constante.

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds} = \text{const.}}$$

$$g_d = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right|_{V_{gs} = \text{const.}} = \frac{1}{R_{ds}}$$

La définition de g_m et de g_d nous permet d'examiner directement le gain intrinsèque $G_{int.}$ en tension d'un FET :

$$G_{int.} = - \frac{\partial V_{ds}}{\partial V_{gs}} = \frac{g_m}{g_d}$$

En réalité, le gain réel G d'un FET dépend de la résistance de charge R_L ou plus précisément la résistance de charge effective $R_{L'}$.

$$R_{L'} = \frac{R_L}{g_d R_L + 1}$$

$$G = g_m R_{L'} = \frac{g_m R_L}{g_d R_L + 1}$$

Paramètres de bruits

Divers bruits dans un FET à basses températures sont en général, le bruit thermique $e_{n(therm)}$, le bruit de grenaille i_n , et le bruit $1/f$. Le bruit thermique et le bruit de grenaille peuvent être décrits d'une manière précise. Le bruit thermique $e_{n(therm)}$ ne dépend que de la résistance et de la température :

$$e_{n(therm.)} = \sqrt{4k_B TR}$$

Le bruit de grenaille i_n est dû à la fluctuation liée aux électrons qui traversent un barrière. Dans un FET avec une grille en contact du type Schottky, ce bruit se mesure par le courant de fuite de grille

I_{gs} :

$$i_{n(shot)} = \sqrt{2eI_{gs}}$$

Le bruit $1/f$ peut être décrit par une formule empirique observée par Hooge en 1969. Pour un FET, cette formule relie la densité spectrale de bruit en courant $S_{I_{ds}}$ avec un coefficient de Hooge α_H , et I_{ds}^2 , le nombre de charge total sous la grille N , et la fréquence f :

$$S_{I_{ds}} = \frac{\alpha_H I_{ds}^2}{Nf}$$

Il faut indiquer que N est un paramètre complexe qui dépend aussi bien de V_{ds} que de V_{gs} . La linéarité de la distribution de charge sous la grille dépend surtout de V_{ds} . Dans le régime linéaire, il est encore possible d'estimer approximativement ce paramètre. Mais un transistor fonctionne normalement dans le régime de saturation. Il est donc impossible de déterminer N . Il faut souligner aussi qu'actuellement il n'y a pas de formule pour décrire le bruit $1/f$ et les paramètres continus directement mesurables dans un FET, surtout dans le régime de saturation.

Nous montrerons le développement pour substituer le paramètre N par la définition de la vitesse moyenne d'électrons \bar{v} sous la grille :

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{L_g} v(x) n(x) dx}{\int_0^{L_g} n(x) dx}$$

Ici $v(x)$ et $n(x)$ sont respectivement la vitesse d'électrons et la densité sous la grille à la position x . L_g est la longueur de grille. La continuité de courant donne :

$$I_{ds} = e n(x) v(x) W_g$$

W_g est la largeur de grille. De plus, le nombre total d'électrons sous la grille est exactement :

$$N = \int_0^{L_g} n(x) W_g dx$$

Finalement, la formule Hooge dans un FET peut être écrite par :

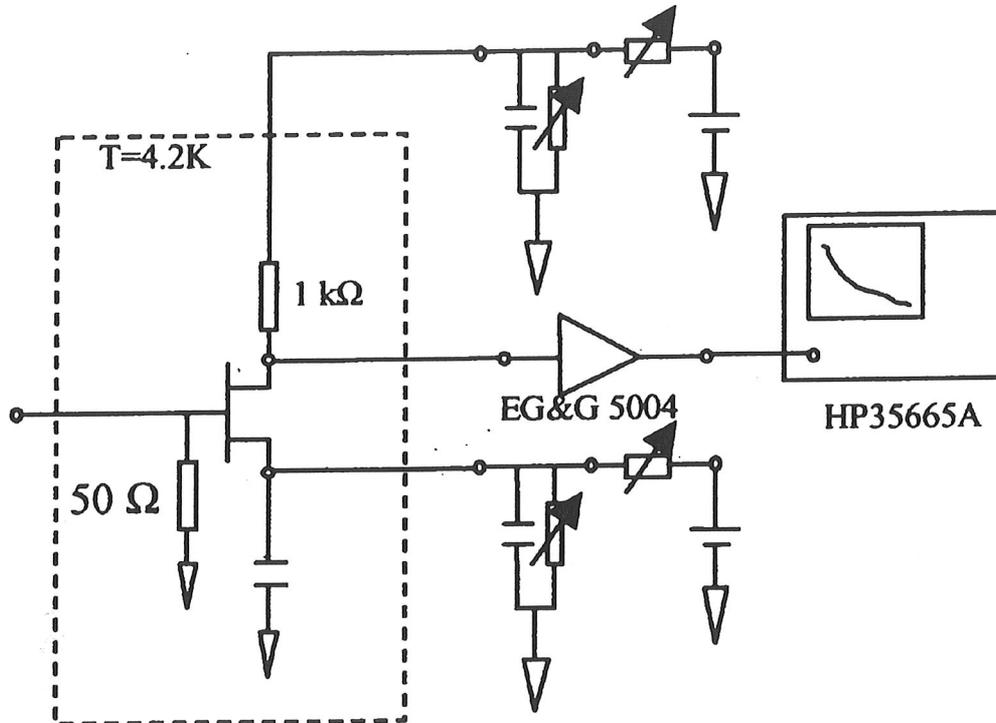
$$S_{I_{ds}} = \left(\alpha_H \bar{v} \frac{e}{f L_g} \right) I_{ds} \equiv \beta I_{ds}$$

Pour une fréquence donnée, si \bar{v} est constante, la relation $S_{I_{ds}}$ et I_{ds} devient linéaire avec un coefficient β :

$$\beta \equiv \alpha_H \bar{v} \frac{e}{f^\gamma L_g}$$

Le bruit $1/f$ équivalent à l'entrée en tension

Du point de vue expérimental, pour que la mesure de bruit soit la plus directe possible, un préamplificateur à 4,2K est construit avec le transistor à tester.



En effet, cet arrangement nous permet de mesurer directement le bruit en tension de sortie du transistor $S_{V(1/f)}$, ainsi que le gain réel G de l'amplificateur *in situ*. Nous pouvons donc obtenir directement le bruit équivalent à l'entrée e_n mesuré :

$$e_n^2 = \frac{S_I}{g_m^2} = \frac{\alpha_H I_{ds}^2}{N f g_m^2} = \frac{S_I R_{L'}^2}{g_m^2 R_{L'}^2} = \frac{S_{V(1/f)}}{G^2}$$

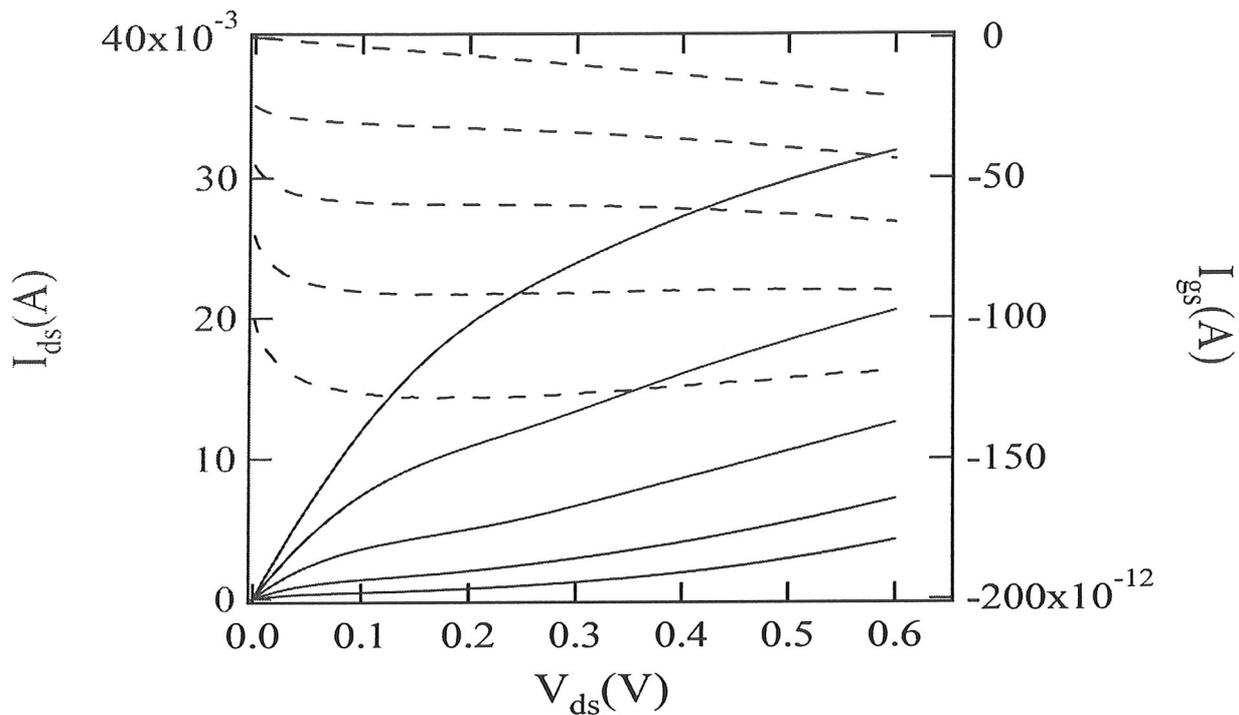
Un autre avantage d'utiliser le paramètre de bruit e_n est qu'on peut comparer directement les performances du HEMT entre différentes configurations géométriques et différents points de polarisation. Enfin, la formule développée précédemment peut être transformée en une relation linéaire entre e_n et I_{ds}/g_m^2 :

$$e_n^2 = \left(\alpha_H \bar{v} \frac{e}{f^\gamma L_g} \right) \frac{I_{ds}}{g_m^2} \equiv \beta \frac{I_{ds}}{g_m^2}$$

Nous montrerons que cette relation peut être observée lorsque la tension de drain est fixe. Ceci nous permet donc d'estimer la valeur de bruit e_n par les paramètres continus I_{ds}/g_m^2 .

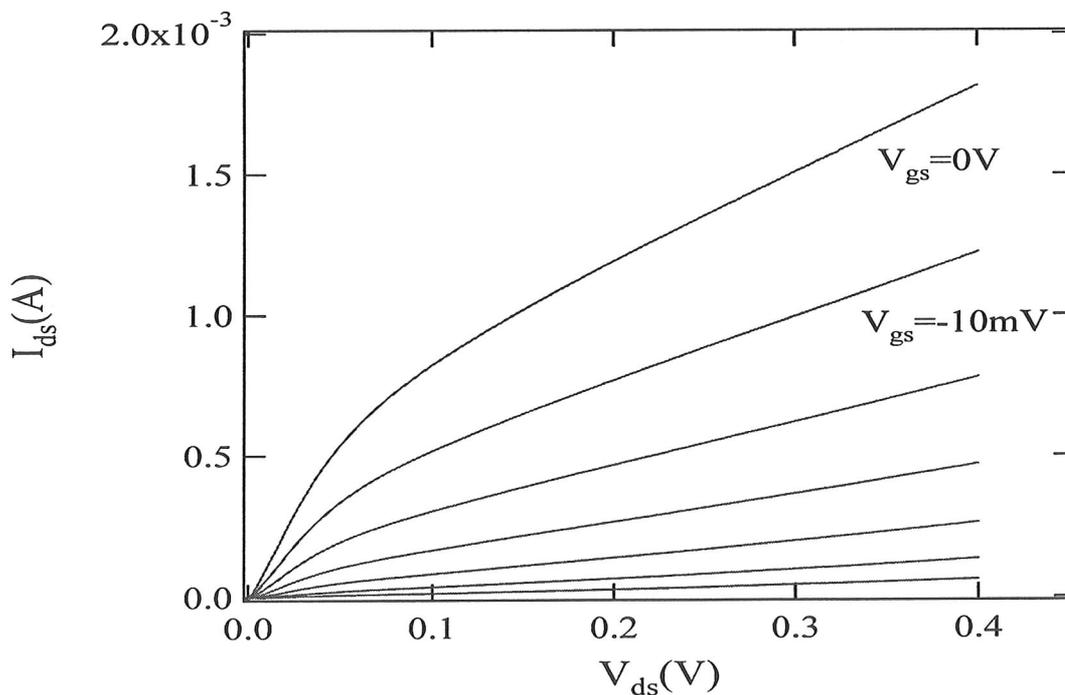
Caractéristiques générales

$I_{ds}-V_{ds}$ à 300K



F3L9P_F7 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$; $V_{gs-max}=0\text{V}$, $\Delta V_{gs}=0,1\text{V}$

$I_{ds}-V_{ds}$ à 4,2K



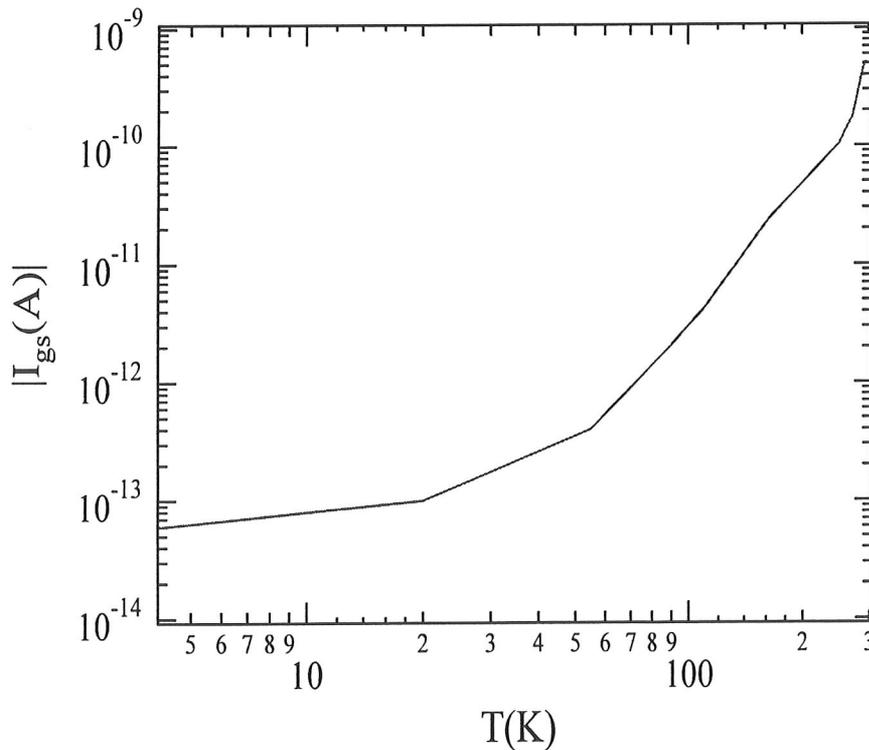
F3L9P_F7 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$; $-I_{gs}<40\text{fA}$

Effets de température

La série de mesures ci-dessous montre bien que certaines performances du HEMT s'améliorent lorsque la température diminue. Notamment pour le courant de fuite de grille et pour la valeur du bruit $1/f$. Par contre, nous pouvons aussi constater qu'il y a une réduction de la densité d'électrons quand la température diminue. Ceci peut être observé par l'évolution de deux paramètres : une augmentation de la tension de grille pour maintenir un courant de drain constant et une faible réduction de la capacité d'entrée. Cette réduction de la densité de charge pourra être due aux résidus d'impureté dans la structure d'hétérojonction. En ce qui concerne la conductance du canal, une légère augmentation de ce paramètre peut être expliquée par une augmentation, plus importante que la diminution de la densité de charge, de la mobilité d'électrons.

I_{gs} en fonction de T

De 300K à 4,2K, $-I_{gs}$ diminue de quelques centaines de pA à quelques dizaines de fA, avec $V_{gs} = -1V$.

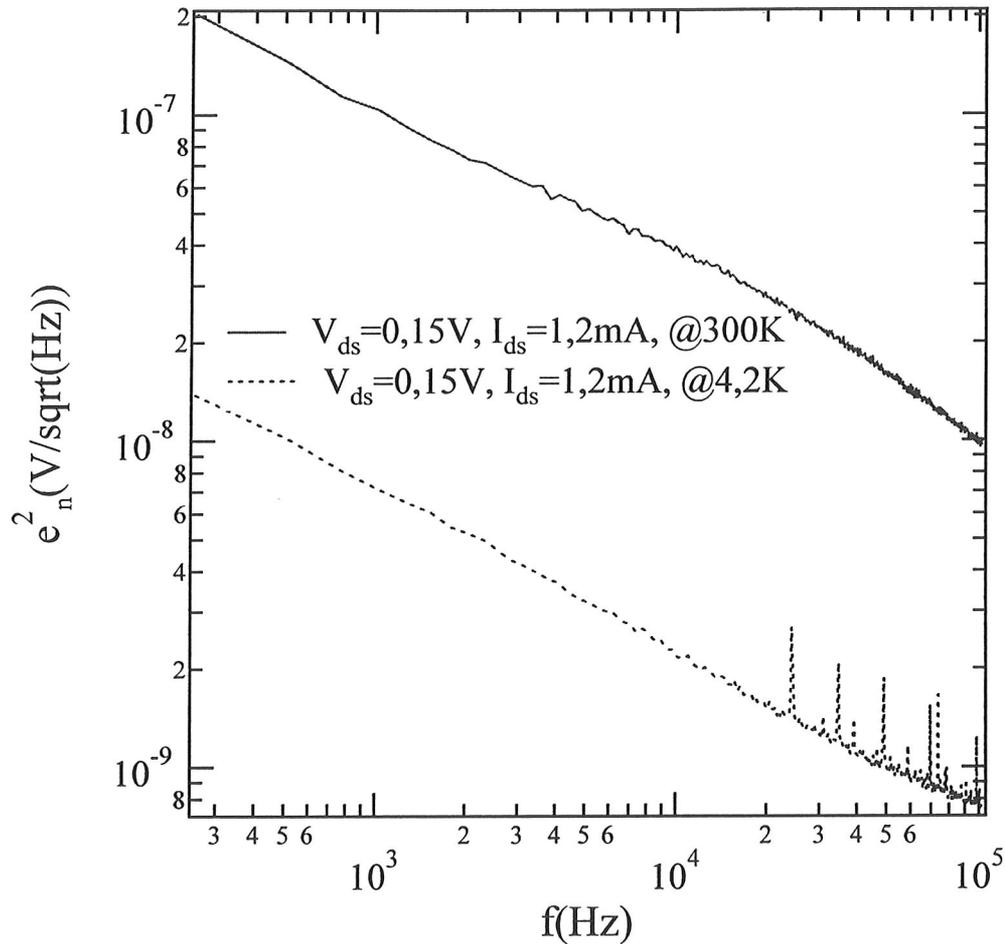


F3L9P_F7 : $L_g = 1\mu\text{m}$, $W_g = 2\text{mm}$

Effets de température

e_n à 300K et à 4,2K

Entre 300K et 4,2K, la valeur du bruit d'entrée e_n est diminuée de plus de 10 fois avec la même condition de fonctionnement : $V_{ds}=0,15V$ et $I_{ds}=1,2mA$.

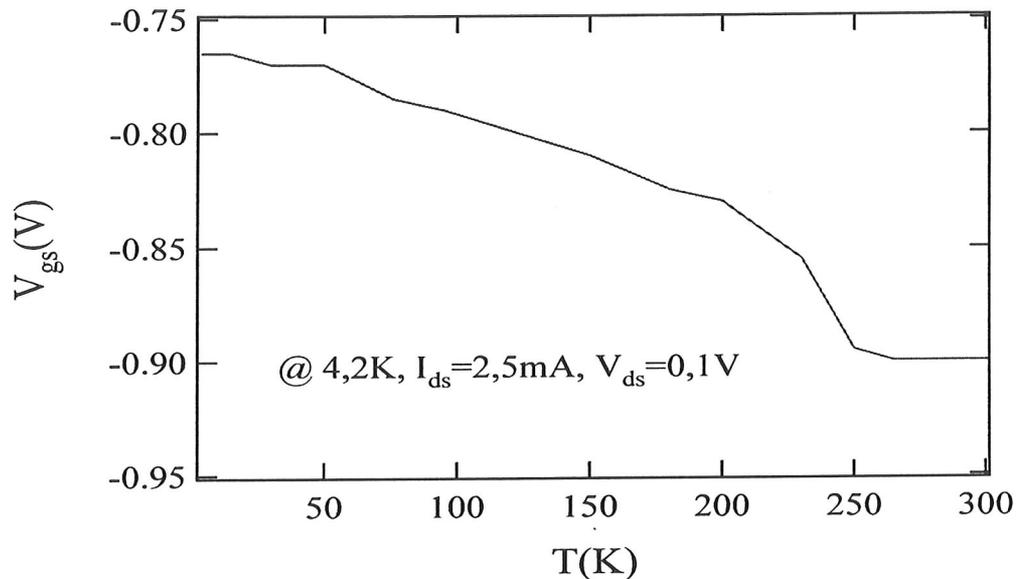


F3L9P_F7 : $L_g=1\mu m, W_g=2mm$

Effets de température

V_{gs} en fonction de T pour maintenir $I_{ds}=2,5\text{mA}$ et $V_{ds}=0,1\text{V}$

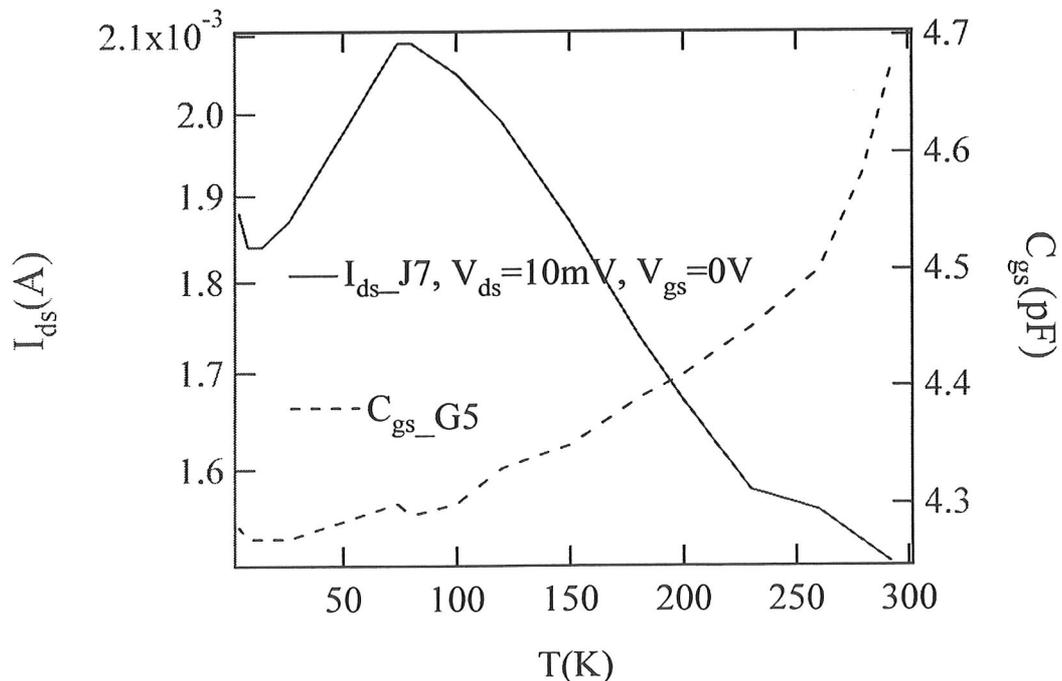
De 300K à 4,2K, pour maintenir le courant de drain constant, V_{gs} augmente de l'ordre de 0,2V



F3L9P_1BISA1 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$

C_{gs} et conductance en fonction de T

De 300K à 4,2K, C_{gs} diminue d'environ 10% avec $V_{gs}=0\text{V}$ pour le HEMT G5; la conductance $I_{ds}/V_{ds}(=10\text{mV})$ augmente d'environ 30% pour le HEMT J7.

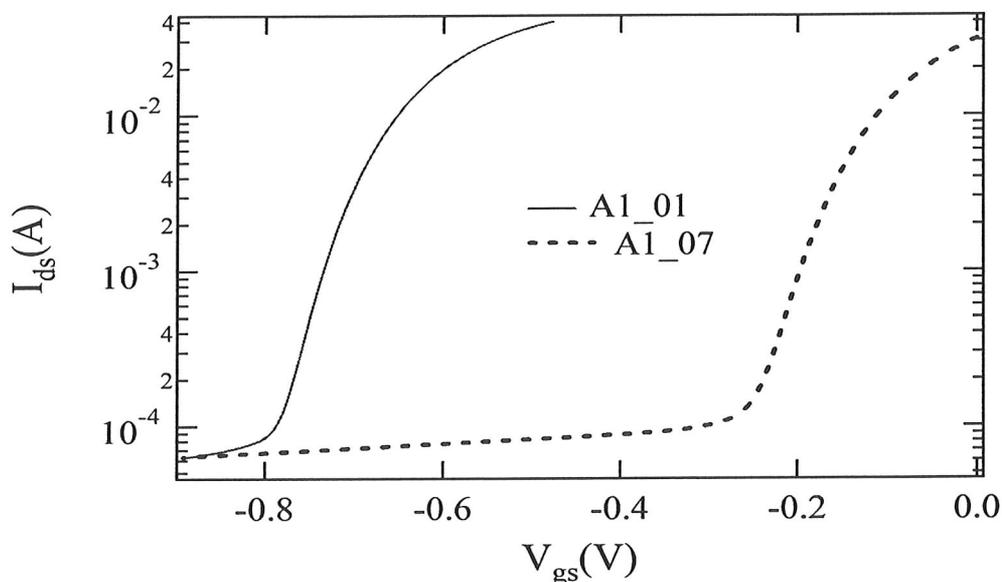


F3L9P_J7 et G5 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$

Effet de polarisation électrique pendant le cycle thermique

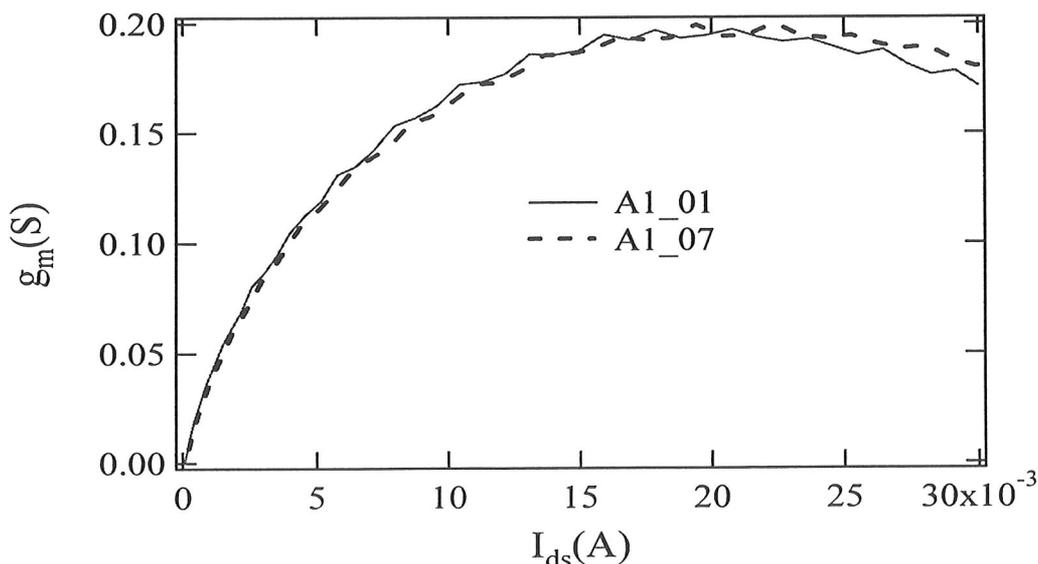
Nous avons observé que pour avoir la même valeur I_{ds} avec une V_{ds} constante à 4,2K, V_{gs} peut varier ou avoir un « shift » selon la condition de la diminution de la température de 300K à 4,2K. Ce « shift » peut être clairement illustré ci-dessous par le HEMT F3L9P_A1. Entre une diminution sans polarisation électrique pour I_{ds} - V_{gs} pendant le cycle 07 et une diminution avec une polarisation électrique maintenue pendant le cycle 01, la différence en V_{gs} pour la même valeur de I_{ds} est d'environ 0,6V. Par contre, la relation entre la transconductance g_m et I_{ds} du transistor reste quasiment identique pour ces deux cycles.

I_{ds} en fonction de V_{gs}



F3L9P_A1 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$, à $V_{ds}=0,1\text{V}$ et à 4,2K

g_m en fonction de I_{ds}

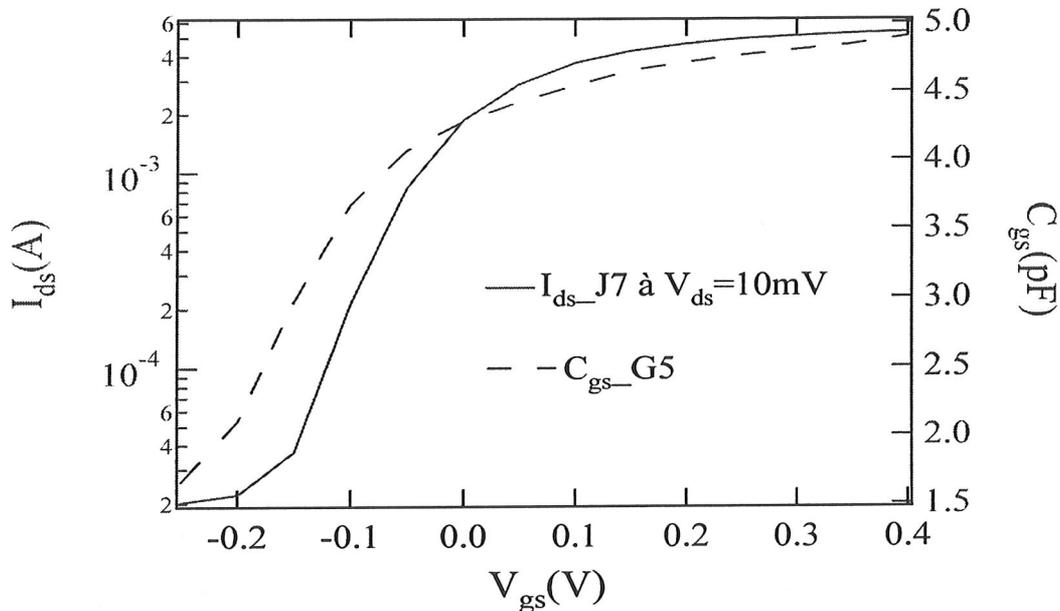


F3L9P_A1 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$, à $V_{ds}=0,1\text{V}$ et à 4,2K

Résultats à 4,2K

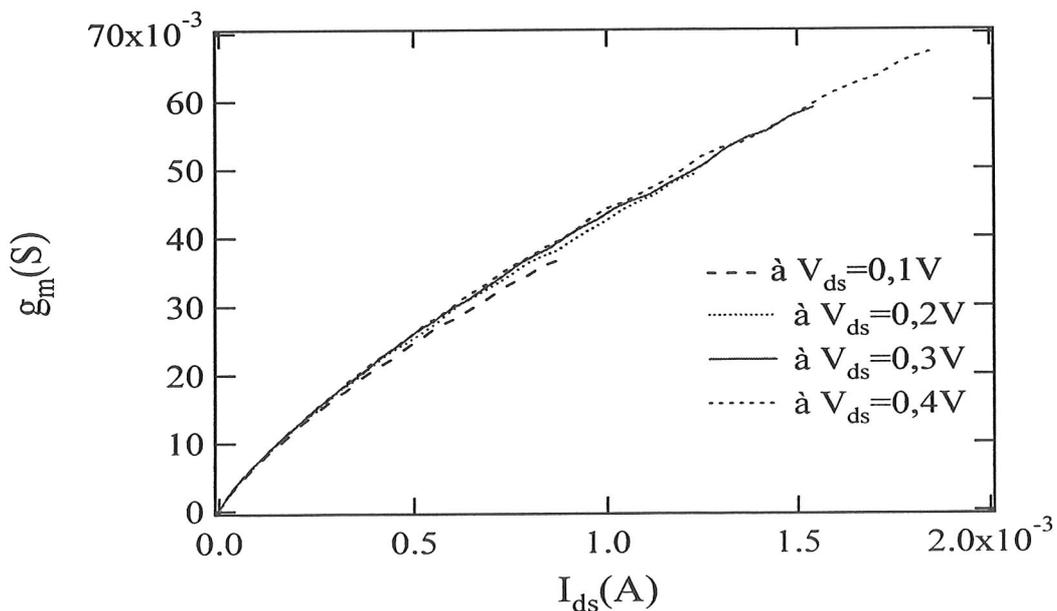
Nous montrons ci-dessous la variation de la conductance du canal $I_{ds}(V_{ds}=10\text{mV})$ et C_{gs} en fonction de V_{gs} . Nous avons observé que la conductance du canal peut varier de 10^9 fois avec une variation de V_{gs} de l'ordre de 1V. C_{gs} pour la surface de grille de $1\mu\text{m}\times 2000\mu\text{m}$ est inférieure à 5pF. Par la relation g_m-I_{ds} pour différentes V_{ds} , nous pouvons noter que g_m peut atteindre plus de 40mS pour un I_{ds} de 1mA.

$I_{ds}(V_{ds}=10\text{mV})$ et C_{gs} en fonction de V_{gs}



F3L9P_J7 et G5 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$

g_m en fonction de I_{ds} pour différentes V_{ds}

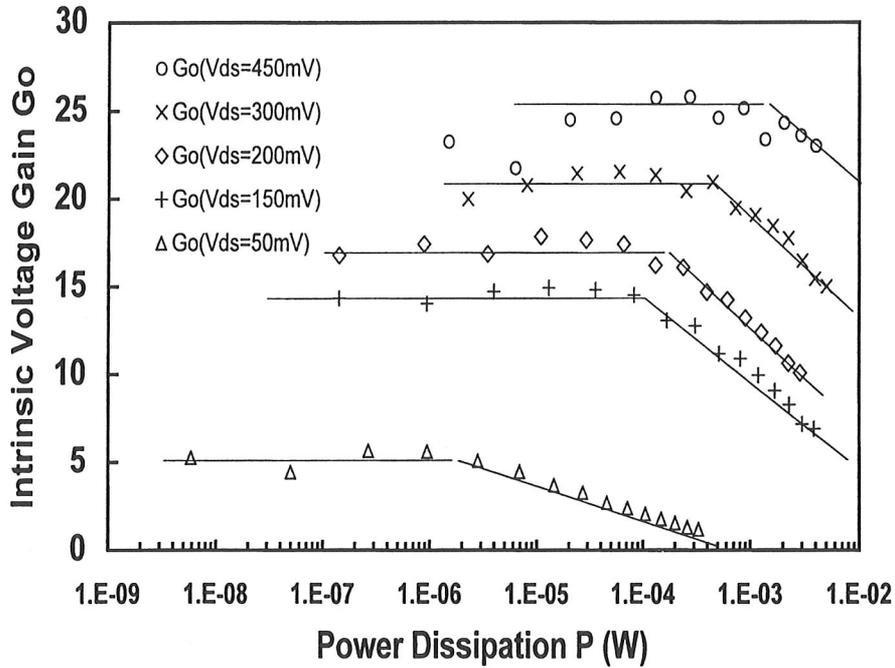


F3L9P_F7 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$

Résultats à 4,2K

Nous montrons dans la figure ci-dessous le gain intrinsèque g_m/g_d du HEMT en fonction de I_{ds} à différentes tensions V_{ds} , ou en fonction de la puissance de dissipation. Nous pouvons observer qu'avec une puissance de dissipation très inférieure à un milli-watt, ce type de transistor peut fournir un gain intrinsèque largement supérieur à un.

Gain intrinsèque g_m/g_d en fonction de $I_{ds} * V_{ds}$

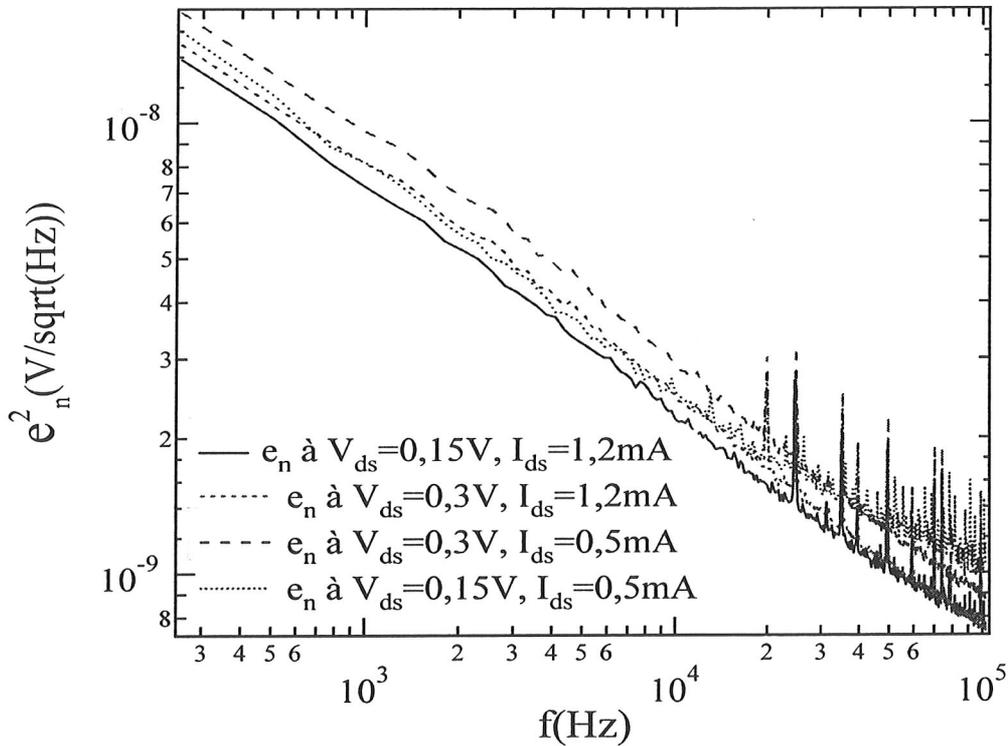


F3L9G_B3 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=4\text{mm}$

Résultats à 4,2K

Comme exemple, nous présentons les quatre spectres de bruit e_n du HEMT de la série F3L9P, en fonction de I_{ds} et V_{ds} . Les valeurs de la polarisation, de la puissance de dissipation, du gain effectif G correspondant mesuré et les valeurs de bruit sont résumées dans le tableau ci-dessous. La résistance de charge R_L du préamplificateur à 4,2K est de $1k\Omega$.

e_n en fonction de I_{ds} et V_{ds}



V_{ds} (V)	I_{ds} (mA)	$V_{ds} \times I_{ds}$ (mW)	G $R_L=1k\Omega$	e_n @ 1kHz (nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	e_n @ 10kHz (nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	e_n @ 100kHz (nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
0,15	1,2	0,18	9,2	7,1	2,2	0,77
0,3	1,2	0,36	13,3	8,0	2,5	0,75
0,15	0,5	0,075	8,5	8,1	2,5	1,0
0,3	0,5	0,15	11,3	9,5	2,9	0,88

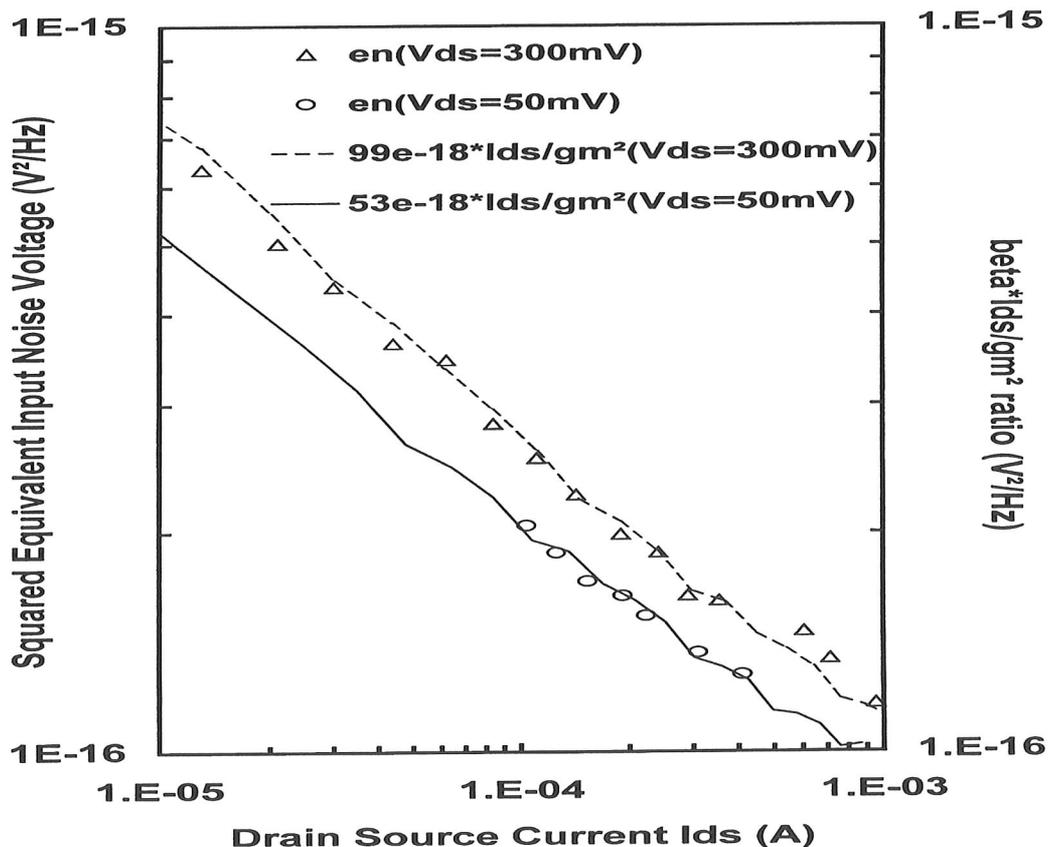
F3L9P_F7 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$

Bruit $1/f$ et paramètres continus à 4,2K

La relation entre les valeurs du bruit $1/f$ et les paramètres continus est particulièrement intéressante pour deux raisons. Tout d'abord, cette relation nous permet d'estimer les valeurs de bruit de composant par les paramètres continus qui sont plus facilement mesurables. Ensuite, une recherche de la diminution de ce bruit peut être envisagée. Expérimentalement, lorsqu'on varie I_{ds} en maintenant V_{ds} fixe, cette relation peut être observée, comme illustrée dans la figure ci-dessous, pour le HEMT F3L9P_E1, entre e_n^2 et I_{ds}/g_m^2 en fonction de I_{ds} . Les valeurs mesurées sont en bon accord avec la formule développée précédemment :

$$e_n^2 = \beta \frac{I_{ds}}{g_m^2}$$

Nous pouvons déduire que $\beta=53\text{A/Hz}$ pour $V_{ds}=50\text{mV}$ et 99A/Hz pour $V_{ds}=0,3\text{V}$.



F3L9P_E1 : $L_g=1\mu\text{m}$, $W_g=2\text{mm}$. e_n^2 (à 1kHz) en fonction de I_{ds} pour $V_{ds}=50\text{mV}$ et $0,3\text{V}$.

Performances obtenues

Nous résumons les performances obtenues avec le HEMT que nous avons réalisé et caractérisé, particulièrement pour la série F3L9P et F3L9G avec une longueur de grille de $1\mu\text{m}$:

- un faible courant de fuite de grille ($<0,1\text{pA}$ à $4,2\text{K}$)
- une forte transconductance ($>40\text{mS}$ à un courant de drain de 1mA)
- la relation g_m-I_{ds} peut être conservée à $4,2\text{K}$ même avec un « shift » en V_{gs} entre différents cycles thermiques
- la conductance du canal peut varier de 10^9 avec une variation de V_{gs} d'environ de 1V
- un fort gain intrinsèque peut être réalisé à la condition d'une puissance de dissipation très inférieure à 1mW
- enfin nous résumons et comparons dans le tableau ci-dessous la configuration de grille, la puissance de dissipation, la capacitance de grille, le gain mesuré, la valeur de bruit à 1kHz , et la fréquence à partir de laquelle la valeur de bruit sera inférieure à $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour différentes séries de HEMT à $4,2\text{K}$:

série	$L_g \times W_g$ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	$I_{ds} \times V_{ds}$ μW	C_{gs} PF	G à $R_L=1\text{k}\Omega$	e_n à 1kHz $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	$\leq 1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (kHz)
F3L2G	14x3000	270	~ 60	14,7	2,5	≥ 7
F3L5G	4x4000	250	~ 20	30,2	2,6	≥ 5
F3L9G	1x4000	250	~ 8	13,5	7,5	≥ 15
F3L9P	1x2000	180	~ 4	9,2	7,1	≥ 50

Conclusions et Perspectives

Nous rappelons d'abord que la réalisation d'un transistor performant pour fonctionner à 4,2K n'est pas une chose aisée car cette recherche a démarré depuis plus de dix ans avant notre investigation. Nos travaux pour cet objectif ont pu bénéficier de l'amélioration des matériaux d'hétérostructure par la croissance en jets moléculaires. Depuis de nombreuses années, nous avons acquis au LPN la maîtrise de la technique de fabrication des dispositifs du type de HEMT pour un fonctionnement à très basse température. Les résultats des HEMTs pseudomorphiques AlGaAs/InGaAs à 4,2K ont démontré leurs performances dans différents aspects par rapport au JFET en silicium. La valeur de bruit de ce transistor peut être au-dessous de 1nV/Hz selon la gamme de fréquence. Enfin, les résultats ci-dessus montrent que le HEMT pourra être un bon candidat pour la future cryoélectronique à 4,2K.

Cependant, la valeur de bruit $1/f$ de nos HEMTs à 4,2K est encore très supérieure à celle du JFET en silicium à 300K, lorsque la fréquence est inférieure à 1kHz. Pour réduire ce bruit, nous allons étudier des corrélations éventuelles entre le bruit $1/f$ de HEMT et la mobilité électronique. La structure de HEMT conventionnelle AlGaAs/GaAs (mais avec une concentration d'Aluminium de 22%) sera utilisée car la mobilité électronique dans cette structure peut varier de quelques $10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à 4,2K. Cette étude nous conduira à une meilleure compréhension du bruit $1/f$ dans HEMT et de la limite physique et technologique. Afin de réaliser un HEMT ayant un bruit $1/f$ au-dessous de $1 \text{ nV}(\text{Hz})^{-1/2}$ à partir de l'ordre de kilo Hertz avec une puissance de dissipation de quelques dizaines de micro-watt à 4,2K.