

LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE D'ELECTRONS (HEMT)

Ayant vu le jour en 1980, la technologie HEMT (High Electron Mobility Transistor) a rapidement progressé tant dans le domaine numérique qu'analogique. Faisant le point sur l'évolution des transistors à haute mobilité d'électrons – autrement dit, HEMT – l'étude ci-après traite notamment des caractéristiques hyperfréquences de ces nouveaux composants, de leur technologie, ainsi que de leur intégration.

Généralités

En raison de la dynamique supérieure d'électrons des canaux HEMT et des propriétés électriques de leur structure, les HEMT ont un avantage fondamental sur les autres composants.

Le tableau 1 résume brièvement les caractéristiques désirées pour des circuits numériques et analogiques avec les caractéristiques physiques et structurelles du composant qui en découlent.

Dans ce tableau, plusieurs des caractéristiques fondamentales des HEMT sont passées en revue pour chaque exigence du composant correspondant.

Pour des circuits SSI ou MSI, le point le plus important n'est pas la puissance dissipée par la porte, mais la fréquence de transition moyenne, sur toute la variation d'amplitude de la tension logique. Pendant la commutation, la vitesse du composant est limitée à la fois par la mobilité en champ faible et par la vitesse de saturation.

La mobilité en champ faible habituellement obtenue est de 8 000 cm²/V.s à 300 K et de 40 000 cm²/V.s. à 77 K.

La vitesse de saturation mesurée avec des structures HEMT à température ambiante a été évaluée entre 1,5 et 1,9 × 10⁷ cm/s.

Les propriétés de transfert des électrons supérieures dans les canaux HEMT conduisent à une fréquence de transition moyenne élevée.

Si l'on passe aux circuits LSI-VLSI, on doit réduire la dissipation par porte sans sacrifier la vitesse.

Pour réduire la puissance, la variation d'amplitude de la tension logique doit être réduite. Cela nécessite des tensions de seuils contrôlées avec précision avec une déviation standard de la tension du seuil représentant une petite fraction de la variation de tension logique.

La valeur obtenue actuellement pour cette variation de tensions de seuil des HEMT est de 16mV pour des « Wafers » de 2 pouces.

La nécessité d'une valeur de transconductance g_m élevée avec une faible variation des tensions logiques signifie que la mobilité en champ faible doit être maximale. La transconductance g_m dans le canal est donnée approximativement par la formule :

$$g_m = (V_{GS} - V_{TM})$$

dans laquelle les notations ont leur signification habituelle ; K est donné par la relation $K = (\epsilon \mu_n W_g / 12dL_G)$, où ϵ est la constante diélectrique, μ_n la mobilité des électrons, W_g la largeur du canal, de l'espace entre la porte et le canal L_G la longueur de la porte.

La valeur de K pour un HEMT à porte de 1 micron à 77 K est habituellement de 650mA/V² par millimètre de longueur de porte.

Cette valeur de K est à peu près huit fois plus grande que pour les MESFET AsGa classiques.

Pour obtenir un haut rendement et une grande fiabilité, la struc-

Applications	Caractéristiques nécessaires	Performances du HEMT
Numériques : SSI-MSI LSI-VLSI	* fréquence de transition f_t élevée sur la variation de tensions logiques V_L * grande uniformité des tension de seuil * haute transconductance g_m pour une faible variation de V_L * structure simple	Hautes valeurs de u et de V_s à 300 K et 77 K 6 V _{TH} = 16 mV pour tranches de 2 pouces A 77 K = 650 mA/V ² mm pour $L_G = 1 \mu m$ 6 marques pour 2 niveaux d'interconnexion
Analogiques Faible bruit CI Hyperfréquence	* haute f_t à faibles courants de drain * haute f_{Tmax} * haute f_{max} * uniformité des paramètres * caractéristiques stables	$F_T = 30 \text{ GHz } I_{ds} = 5 \text{ mA}$ $\bar{W}_G/L_G = 200/0,5 \mu m$ $f_{Tmax} = 38 \text{ GHz } L_G = 0,5 \mu m$ $f_{max} = 65 \text{ GHz } L_G = 0,5 \mu m$ 6 $g_m r_{\bar{m}} = 1,5 \%$ sur une tranche de 2 pouces pas d'effet de canal court

ture du composant doit être aussi simple que possible.

Des structures essentiellement planar sont facilement obtenues par des technologies simples, la plupart étant communes aux circuits MOSFET silicium et MESFET AsGa.

Pour réaliser des RAM statiques et des prédiffusés HEMT avec deux niveaux d'interconnexion, il faut seulement six masques. Ce sont les circuits intégrés les plus simples, à la connaissance de l'auteur.

Il faut plus de 10 masques pour les circuits bipolaires et plus de 8 pour les circuits intégrés MESFET AsGa.

Si l'on considère des applications analogiques, il faut un composant qui ait une fréquence de transition de f_T élevée à un courant de drain faible pour obtenir de bonnes performances en niveau de bruit, ceci parce que la figure de bruit décroît avec le courant drain ainsi que lorsque f_T augmente.

On obtient expérimentalement une fréquence de transition de 38 GHz avec un HEMT à porte de $0,5 \mu m$ et pour une figure de

bruit optimale, fréquence qui est 1,5 fois plus grande que pour les MESFET AsGa à la température ambiante.

Pour des applications de circuits intégrés monolithiques hyperfréquences, des valeurs maximales de f_T à la fréquence maximale d'oscillation f_{max} , sont des données critiques.

D'autres points critiques sont la grande uniformité des paramètres des circuits et des caractéristiques stables. L'écart type obtenu par rapport à la transconductance moyenne est de 1,5 sur une tranche de 2 pouces. Dans des circuits intégrés monolithiques pour ondes millimétriques, on doit avoir à traiter des portes inférieures à $0,5 \mu m$, avec des effets dus à l'étréouesse du canal telle que la dérive de la tension de seuil et l'accroissement de la conductance de sortie.

La structure HEMT a un avantage inhérent dans la réduction de l'effet d'étréouesse du canal parce que le couplage porte-canal peut être augmenté en accroissant la concentration du dopage pour blinder les champs du drain sans

altérer la mobilité en raison du schéma de modulation du dopage.

Cela donne des caractéristiques tension/intensité stables et facilement concevables même en régime de porte submicronique. On a déjà confirmé expérimentalement qu'il n'existait aucun effet de réduction de canal jusqu'à $0,5 \mu m$.

Performances hyperfréquence et caractéristiques de bruits des HEMT

La figure 1, donne la fréquence de transition f_T en fonction de la largeur de porte dans le cas d'un HEMT expérimental et d'un MESFET AsGa décrit plus loin [2] [6]. Les valeurs de f_T pour les HEMT sont à peu près le double de celles du MESFET AsGa pour des longueurs de porte de $0,25$ à $0,5 \mu m$.

On a ici modélisé un HEMT et un MESFET AsGa pour établir leurs

fréquences de transition ; f_T est défini par $g_m / 2 \pi C_{gs}$, où g_m est la transconductance intrinsèque du composant et C_{gs} est la capacité porte-source.

Le paramètre g_m peut être dérivé de la modélisation du HEMT [7], qui utilise l'approximation linéaire de Turner et Wilson [8] pour la caractéristique du champ de vitesse ; quant à C_{gs} , il est calculé comme une fonction de la tension porte-source V_{GS} en négligeant la variation de capacité du support le long du canal [9]. Il en résulte une surestimation de la valeur de f_T .

Comparons les valeurs de f_T du HEMT et du MESFET AsGa à température ambiante. Pour analyser les caractéristiques tension-intensité du MESFET, on utilise la modélisation du transistor donnée par Hower et Bechtel [10].

La capacité porte-source du MESFET est approximativement : $C_{GS} = L_G W_G (\epsilon_s \phi N_D / 2V_B)^{1/2}$ où les significations des différents termes sont indiqués dans le tableau II.

Les paramètres du composant et des matériaux constituant l'HEMT et le MESFET ayant la même tension de seuil sont également indiqués dans le tableau II.

Dans ce tableau, deux valeurs de mobilité du HEMT sont supposées. Ce sont la même valeur (4 000 cm²/V.s) que pour le MESFET pour la 1^{re} colonne et une valeur obtenue (8 000 cm²/V.s) dans les canaux du HEMT pour une température de 300 K dans la 3^e colonne.

Les résultats calculés sont donnés dans le tableau III. On note dans ce tableau que la fréquence de transition f_T du HEMT qui a la même mobilité en champ faible que celle du MESFET est de l'ordre de 30 % plus haute que la fréquence de transition de ce dernier.

La structure HEMT semble de ce fait avoir un avantage inhérent sur celle du MESFET dans les aptitudes à la haute vitesse.

La fréquence f_T du HEMT, avec une valeur plus grande de la mobilité 8 000 cm²/V.s est environ double de celle du MESFET.

Les facteurs déterminant la figure de bruit du composant sont donnés par la relation empirique de Fukui sur la figure de bruit hyper-fréquences [11]. La relation pour une figure de bruit minimale est la suivante :

$$F_{\min} = 1 + \frac{K_f}{f_T} \sqrt{g_m (R_s + R_g)} \quad (1)$$

Tableau II : Paramètres du composant et des matériaux entrant dans la constitution d'un HEMT et d'un MESFET AsGa

Paramètre	HEMT (I)	MESFET	HEMT (II)
Longueur de porte L_G (μm)	1	1	1
Largeur de porte W_G (μm)	20	20	20
Mobilité μ_n (cm ² /V.s)	4 000	4 000	8 000
Champ crête E_m (kV/cm)	4	4	2,5
Épaisseur de Al Ga As t(nm)	51	-	51
Épaisseur d'As Ga t(nm)	-	110	-
Concentration de dopant N_D (10^{17} cm ⁻³)	-	-	-
N_D en Al Ga As	7.9	-	7.9
N_D en As Ga	-	1.5	-
Permittivité ES (pF / cm)	-	-	-
Al Ga As	1.06	-	1.06
As Ga	-	1.15	-
Potentiel intrinsèque V_b (V)	-	0.65	-

	VTH (V)	IDS (mA)	gm (mS)	Cgs (fF)	fT (GHz)
HEMT (I)	- 0.650	2.32	5.45	35.6	24
MESFET	- 0.650	1.25	3.37	29.1	18
HEMT (II)	- 0.650	3.21	8.35	35.6	37

Tableau III : caractéristiques électriques calculées pour le HEMT et le MESFET As Ga avec les paramètres indiqués au tableau 2.

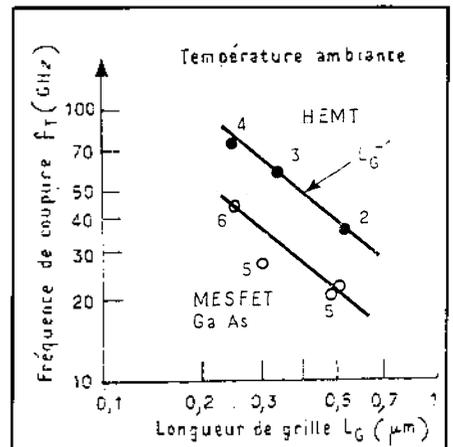


Fig. 1 : Fréquence de coupure f_T en fonction de la longueur de porte pour des HEMT expérimentaux et des MESFET As Ga.

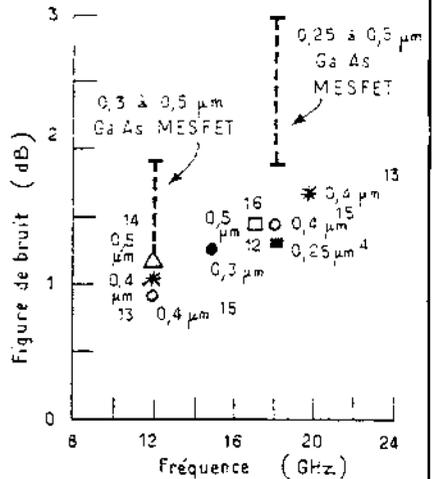


Fig. 2 : Figure de bruit minimum en fonction de la fréquence résumant les performances des HEMT faible bruit. En comparaison, la performance typique du MESFET As Ga est tracée.

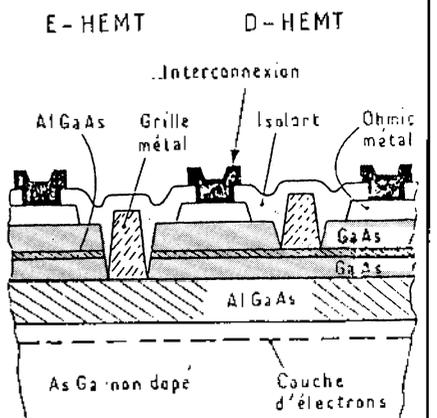


Fig. 3 : Coupe d'un inverseur en mode appauvrissement/enrichissement (D/E) pour un circuit FET HEMT à couplage direct.

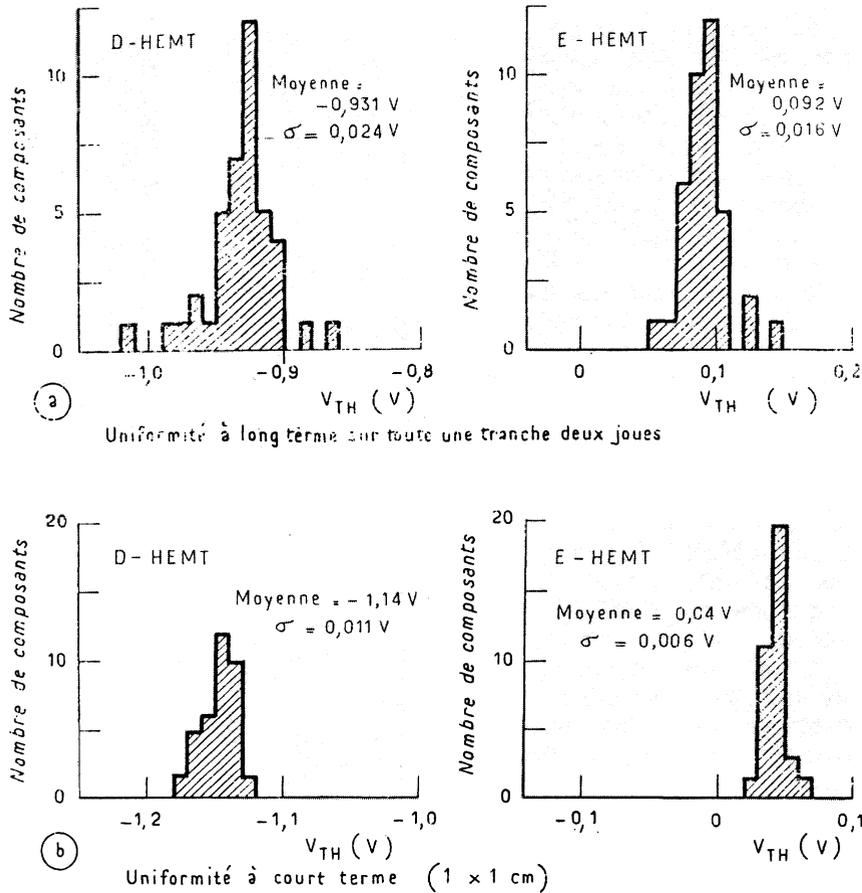


Fig. 4 : Résultats les plus avancés de l'uniformité du courant de seuil des HEMT. a/ à long terme sur toute une tranche de 2 pouces. b/ à court terme (1 x 1 cm).

où K est un facteur d'adaptation, f une fréquence de mesure, g_m la transductance, R la résistance de source et R_G la résistance de porte.

La valeur de K pour les canaux HEMT et MESFET AsGa est donnée comme étant respectivement aux alentours de 1,5 et 2,5. Selon la formule (1), des valeurs plus élevées de f_T mènent à des figures de bruit plus faibles. On a réalisé récemment un HEMT faible bruit avec porte de $0,4 \mu\text{m}$ auto-alignée et une résistance de source améliorée. Cette dernière a été de 4,5 à $2,50 \Omega$.

Le composant présentait une figure de bruit de 1,08dB pour un gain associé de 12,7dB à 12 GHz et une figure de bruit de 1,7dB avec un gain de 8,8dB à 10 GHz. 10 GHz.

En dépit d'une porte assez longue, la performance est comparable aux meilleurs résultats publiés pour un MESFET AsGa à porte de $0,25 \mu\text{m}$. Le graphique donnant la figure de bruit minimal en fonction

de la fréquence (voir fig. 2) récapitule les performances d'un HEMT faible bruit.

La performance en niveau de bruit du MESFET AsGa est également tracée sur le graphique à titre de comparaison.

Les améliorations de la figure de bruit apportées par le passage du MESFET AsGa au HEMT semblent devenir significatives aux fréquences plus élevées.

Considérations sur la technologie des LSI HEMT

Pour atteindre une haute intégration, plusieurs aspects doivent être considérés : la structure affinée de la fabrication et la qualité LSI des matériaux obtenus par épitaxie à jet moléculaire.

La figure 3 montre une coupe typique de la structure d'un HEMT à enrichissement (E) et à appau-

vrissement (D) formant un inverseur pour un circuit logique à couplage direct.

La structure de base consiste en une couche non dopée d'AsGa de 600 nm, d'une couche d'AsGa A1, dopée à $2.10^{18} \text{ Cm}^{-3}$ avec du silicium de 30 nm et d'une couche de couverture de 70nm de AsGa développée sur un substrat semi isolant par épitaxie à jet moléculaire.

La mobilité des électrons mesurée par effet Hall, a été trouvée de $8\ 000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ à 300 K et de $38\ 000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ à 77 K. La concentration de nuage bidimensionnel d'électrons était de $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ à 300 K et de $8,4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ à 77 K.

Une fine couche de AsGa A1, destinée à stopper la gravure sèche est déposée sur la couverture de AsGa si l'on doit fabriquer des HEMT (E) et (D) sur la même tranche.

La fabrication des FET (E) et (D) débute avec la gravure d'ilots mesa superficiels vers la couche AsGa non dopée pour localiser la région active.

Cette gravure mesa est très superficielle ($\approx 150 \text{ nm}$) et très simple à réaliser, facilitant la fabrication du circuit intégré HEMT. Ensuite, la source et le drain des HEMT (E) et (D) sont métallisés

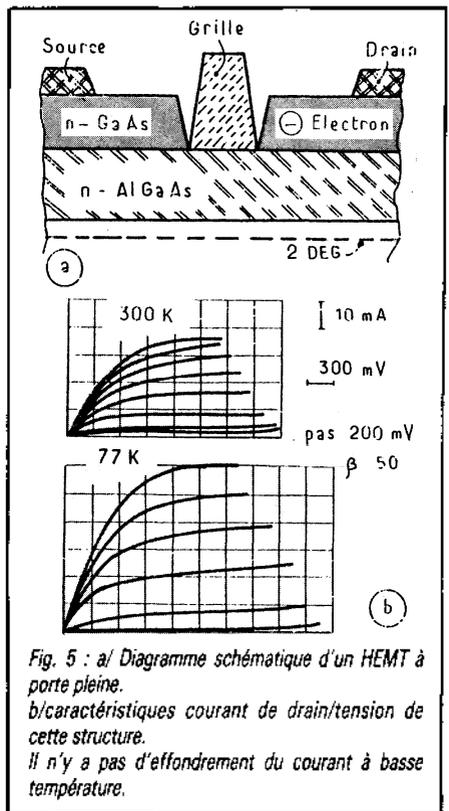


Fig. 5 : a/ Diagramme schématique d'un HEMT à porte pleine. b/ caractéristiques courant de drain/tension de cette structure. Il n'y a pas d'effondrement du courant à basse température.

avec un alliage eutectique AuGe recouvert d'or pour améliorer le contact ohmique avec les nuages d'électrons.

Le tracé de la porte est obtenu par photo-gravure. Ensuite, une gravure sèche sélective utilisant un gaz composé de CCl_2F_2 ET He est réalisée pour enlever la couche de couverture de AsGa, exposant la surface supérieure de la fine couche d'arrêt de AsGaAl.

Le contact Schottky de la porte est obtenu en déposant de l'aluminium. Pour fabriquer les HEMT (E), la fine couche d'arrêt de AsGaAl est retirée par gravure chimique non sélective suivie d'une gravure sèche de la couche suivante de AsGa.

Un isolant en oxyde de silicium est déposé par dépôt en phase vapeur et les connexions, composée de Ti-Pt-Au de la puce aux contacts du circuit sont réalisées par des fenêtres ménagées dans la couche isolante.

La structure epitaxiale unique, associée avec une technique de gravure sèche sélective est un facteur clé pour réaliser des FET à enrichissement et à appauvrissement avec des tensions de seuils contrôlées avec précision.

La tension de seuil V_{TH} du HEMT est fonction de l'épaisseur de la couche d'AsGaAl, de la concentration du dopant dans cette couche, de la barrière de potentiel métal-semiconducteur et de la différence d'énergie entre les bords des bandes de conduction du AsGaAl et du AsGa.

L'uniformité de la tension du seuil est le paramètre clé pour obtenir des LSI présentant un produit logique puissance \times délai de propagation optimal.

L'écart type est de 24 mV pour le HEMT (D) et de 16 mV pour le HEMT (E). Ce sont les meilleurs résultats jamais obtenus dans le domaine des circuits intégrés AsGa.

En figure 4b on a également mesuré l'uniformité à court terme pour les HEMT (E) et (D) à l'intérieur d'une zone de 1 cm \times 1 cm. L'écart type est de 11 mV pour le HMT et de 6 mV pour le HEMT (E).

La tension de seuil des HEMT se situe à l'intérieur d'une plage étroite de tension d'à peu près 50 mV.

Si l'on considère que cette plage de tension de seuil résulte d'une

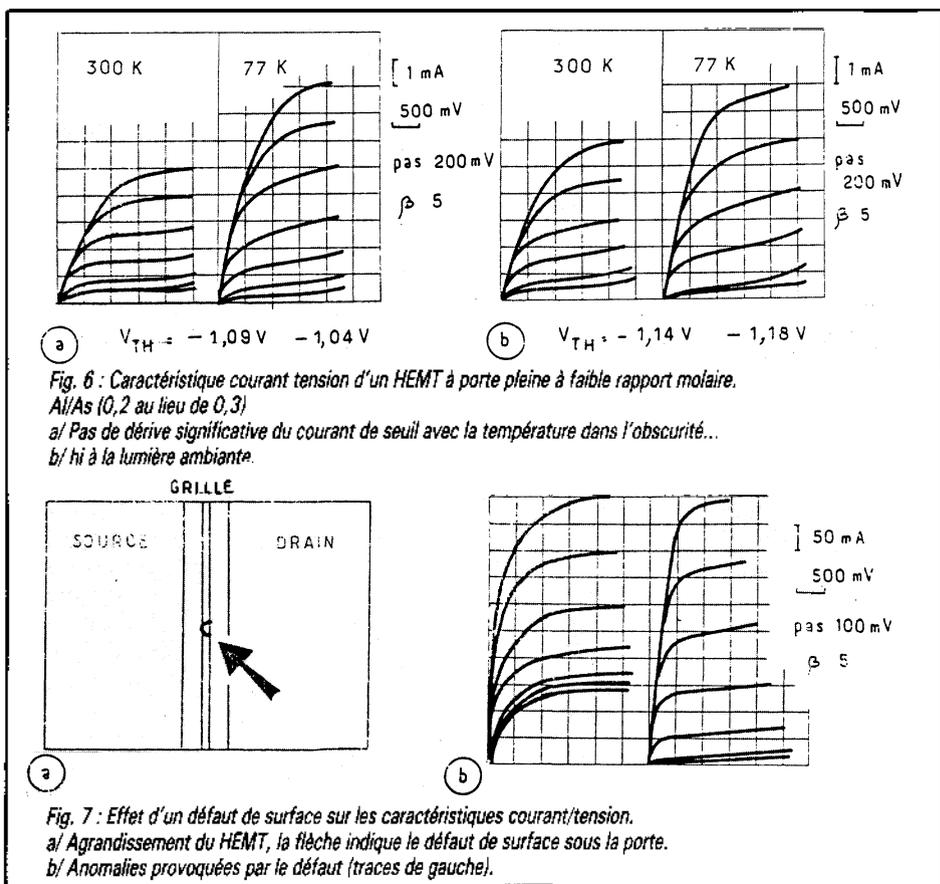


Fig. 6 : Caractéristique courant tension d'un HEMT à porte pleine à faible rapport molaire.

Al/As (0,2 au lieu de 0,3)

a/ Pas de dérive significative du courant de seuil avec la température dans l'obscurité...

b/ hi à la lumière ambiante.

Fig. 7 : Effet d'un défaut de surface sur les caractéristiques courant/tension.

a/ Agrandissement du HEMT, la flèche indique le défaut de surface sous la porte.

b/ Anomalies provoquées par le défaut (traces de gauche).

variation dans l'épaisseur de la couche de GaAsAl, les 50 mV correspondent à une variation d'épaisseur de 8 nm, c'est-à-dire environ seulement deux couches d'atomes.

Ces résultats indiquent un contrôle de la tension de seuil plus que suffisant pour le haut rendement des circuits LSI.

Dans les structures HEMT, la couche de AsGaAl fortement dopée avec des donneurs d'électrons comme le silicium, contient des centres donneurs complexes (DX) qui se comportent comme des pièges à électrons aux basses températures.

On pense que des comportements anormaux à ces basses températures sont liés à ces centres DX. Cela concerne en particulier la distorsion des caractéristiques I-V du drain, une dérive inattendue de la tension de seuil aux basses températures et une photoconduction persistante très sensible.

On a trouvé que la distorsion de la caractéristique de drain I-V dépend du type de structure du composant.

Dans une structure HEMT à porte partielle qui a des surfaces d'Al-

GaAs relativement longues (plus de 100 μm) exposées des deux côtés de la porte, les électrons accélérés par le champ du drain ont suffisamment d'énergie pour passer d'un canal de AsGa à la région AlGaAs, exposée de la porte (du côté du drain) où ils sont capturés par les centres DX. Il en résulte la constitution d'une charge d'espace à cet endroit, ce qui augmente en fin de compte la résistance de sortie du drain dans la zone de fonctionnement linéaire, conduisant à un effondrement de l'intensité de drain.

Pour remédier à ce phénomène à basse température, on a adopté une structure de porte comme indiqué en figure 5a.

La couche d'AlGaAs-n est entièrement recouverte par la couche d'AsGa-n. Il n'y a pas de surface exposée de la porte du côté du drain.

Dans cette structure, des électrons à haute énergie peuvent facilement passer au travers de la fine couche de AlGaAs-n (30nm) sans être capturés et peuvent atteindre la couverture de GaAs-n, ce qui élimine la caractéristique anormale de drain I.V. à basse température, comme on le voit figure 5b, trace du bas.

En ce qui concerne les variations de tension de seuil avec la température, on a noté une dérive de 0,2 à 0,3 V pour une gamme de température de 300 K à 77 K dans un HEMT.

On a réussi à éliminer cette dérive et la photocomposition persistante en optimisant les paramètres du composant.

La structure est essentiellement un HEMT à porte complète avec une réduction de la part d'aluminium par rapport à l'arsenic à 0,2 au lieu de 0,3 initialement.

La figure 6 montre les caractéristiques typiques de drain I.V. Dans l'obscurité (fig. 6a), on n'observe aucune dérive de la tension de seuil entre 300 et 77 K.

Même lorsque l'éclairage ambiant est utilisé, les tensions de seuil sont constantes pour chaque température (fig. 6b).

Dans les tranches traitées par épitaxie à jet moléculaire, il y a beaucoup d'irrégularités de surface que l'on appelle des « défauts ovales ».

Selon les conditions de la croissance des couches, la densité de ces défauts peut atteindre plusieurs milliers de cm. Les défauts ovales ont habituellement des dimensions variant de la fraction de microns à plusieurs microns, qui sont comparables à celles des éléments des circuits LSI.

Les défauts peuvent affecter les caractéristiques I.V de drain comme le montre la figure 7. La figure 7a est un agrandissement du HEMT, la flèche indiquant un défaut ovale sous la porte.

Les caractéristiques I.V du HEMT sans défaut sont montrées sur la trace de droite de la figure 7b pour comparaison. On voit nettement que le courant de drain du HEMT ne peut être annulé par la commande de porte.

Cela suggère que les défauts ovales produisent des canaux conducteurs supplémentaires entre la source et le drain.

Contrairement aux résultats de la figure 7, on a trouvé les caractéristiques I.V du HEMT presque normales excepté une tension de claquage inverse de porte légèrement basse seulement lorsque le défaut ovale était inclus dans la zone de la porte.

Cela indique qu'il faut encore beaucoup de travail de recherche pour clarifier les effets de ces défauts sur les caractéristiques I.V.

Réalisation de circuits intégrés

Depuis la première démonstration de l'aptitude des circuits intégrés HEMT à des grandes vitesses en 1981, les laboratoires disséminés dans le monde ont fait de grands progrès en améliorant les performances et en accroissant la complexité des circuits.

En 1983, Lee et ses collaborateurs ont fabriqué des oscillateurs en anneau HEMT à porte de 1 nm et ont obtenu des temps de commutation de 12,2 ps avec une dissipation par porte de 1,1 mW à température ambiante.

Mendel et ses collaborateurs décrivaient en 1984 des oscillateurs en anneau à porte de 0,7 μ m et avec un temps de programmation de 4,5 ps à 77 K.

C'est le temps de commutation le plus court obtenu jusqu'ici dans un composant à semiconducteur. Pour des circuits plus complexes, Nishuchi et ses confrères ont décrit le fonctionnement satisfaisant d'un diviseur HEMT à porte de 0,5 μ m, basé sur une bascule maître-esclave constituée de huit circuits logiques FET à couplage direct, des portes NOR, un inverseur et quatre buffers de sortie, à une fréquence d'horloge maximale de 5,5 GHz à 300 K (8,9 GHz à 77 K) avec une dissipation de quelques milliwatts (38,2 mW à 77 K).

Le temps de propagation était de 36 ps/porte à 300 K (22 ps/porte à 77 K). Mendel a décrit également des circuits diviseurs à porte de 0,7 μ m avec des portes AND/NOR en logique FET couplage direct, maître-esclave à double horloge obtenant la fréquence d'horloge maxi de 6,3 GHz à 300 K (13 GHz à 77 K) avec une puissance dissipée de 35,4 mW (33,7 mW à 77 K).

La fréquence d'horloge maximale obtenue à température ambiante en technologie HEMT est en sus le double de celle obtenue avec la technologie MESFET de géométrie comparable.

La mémoire RAM statique 1 Kbit en HEMT, a été fabriquée avec une configuration de circuit logique FET à couplage direct à enrichissement et appauvrissement. Un temps d'accès à une adresse

de 0,87 ns avec une dissipation de 360 mW a été obtenu à 77 K. Cela était la première démonstration. Cela était la première démonstration d'un circuit LSI HEMT. Récemment, Kuroda et ses collaborateurs ont réussi à fabriquer une RAM statique HEMT de 4 Kbits.

Elle consiste en un réseau de cellules et des circuits périphériques comme des décodeurs et des circuits de commande de lecture-écriture.

Des règles de conceptions relativement grandes – 3 micromètres – ont été utilisées pour son implantation 26 864 transistors HEMT sont intégrés sur une puce de 4,76 \times 4,35 mm².

Le temps d'accès à une adresse était de 2,0 ns à 77 K (4,4 ns à 300 K) avec une puissance totale de 1,6 W (0,8 W à 300 K). L'avance dans l'intégration des HEMT est très rapide, cette dernière quadruple chaque année, principalement parce que la technologie du silicium maintenant disponibles est compatible avec celle des LSI HEMT.

Une autre raison tient à la grande souplesse intrinsèque de la structure du circuit comme on le voit en figure 3, avec une couche d'arrêt qui est introduite pour utiliser les caractéristiques de la gravure sèche sélective.

Conclusion

En résumé, l'avenir de la technologie HEMT pour les applications numériques à grande vitesse et analogiques à très hautes fréquences apparaît très prometteur. Les développements futurs du HEMT suivront la même histoire que celles des circuits au silicium. Les applications du HEMT commenceront à partir de composants discrets, tels que les transistors à faible bruit qui seront utilisés dans des systèmes hyperfréquences fonctionnant à température ambiante.

Par ailleurs, les progrès récents et remarquablement réalisés dans les performances en faible bruit ont montré la possibilité d'emploi des HEMT dans ces applications, en particulier au-delà de 12 GHz. Une figure de bruit de 1,08 dB a été obtenue à 12 GHz avec un HEMT à porte de 0,5 μ m. D'autres

Composants

peuvent être attendues dans l'avenir.

Dans le secteur du numérique, les hautes fréquences de transition f_T maximales f_{max} atteintes par les HEMT peuvent être avantageuses pour les SSI et MSI tels que les compteurs et les convertisseurs A/N rapides. Les diviseurs les plus rapides réalisés ont un temps de propagation par porte de 22 ps à 77 K (36 ps à 300 K).

Pour les circuits LSI et VLSI l'uniformité et la facilité de contrôle des paramètres du composant sont des sujets difficiles. Les meilleurs résultats d'uniformité de la tension de seuil sur une tranche de 2 pouces sont de 20 mV qui conviennent aux circuits VLSI.

En les utilisant à 77 K, on peut réduire la consommation sans altérer la vitesse. Cela serait avantageux en réduisant le volume des processeurs tout en accroissant les performances du système. Sur ce point, seuls les MOS FET complémentaires au silicium aux températures cryogéniques peuvent fournir des résultats comparables avec la technologie HEMT.

Toutefois, les MOSFET complémentaires ne sont pas aussi rapides que les HEMT LSI avec des règles de conception comparables.

La technologie HEMT à 77 K prendra de ce fait, la position dominante dans les grands systèmes numériques tels que les gros et les super ordinateurs.

La technologie HEMT ouvrira également la porte aux microprocesseurs haute vitesse à basse température si des refroidisseurs économiques de faible encombrement deviennent disponibles.

Compte tenu des résultats actuels, on peut prévoir que le HEMT deviendra une des plus importantes technologies des semi-conducteurs du 20^e siècle, alors que les efforts mondiaux progressent toujours. ■

BIBLIOGRAPHIE

High Electron Mobility transistors par Takashi Mimura, Masayuki Abe et Masaaki Kobayashi paru dans Fujitsu Scientific and Technical Journal Vol 21 N° 3. Adaptation J. Barrier.