

GELE5223 Chapitre 7 : Circuits intégrés

Gabriel Cormier, Ph.D., ing.

Université de Moncton

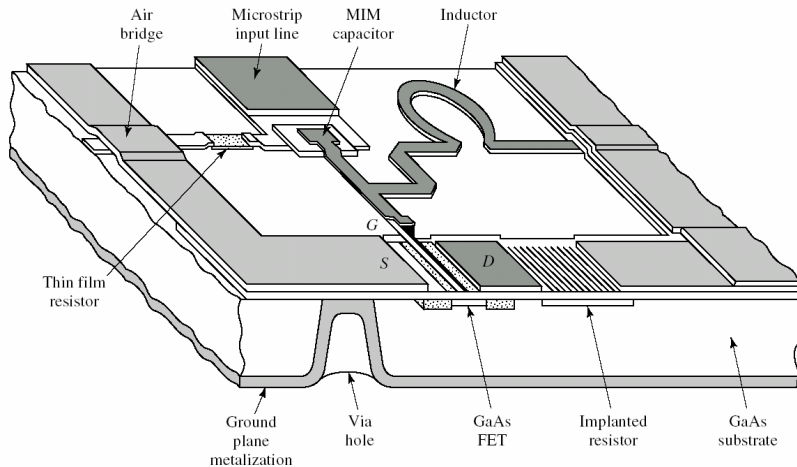
Automne 2010

Contenu

Contenu

- Circuits intégrés hyperfréquences
- Éléments de circuit : inductances, capacités, résistances.
- Transistors (MESFET)

Circuit intégré hyperfréquences



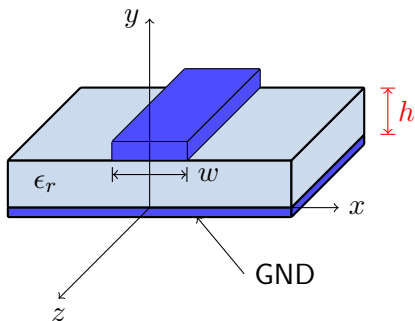
Éléments passifs

- Ligne de transmission : ligne microruban et coplanaire
- Inductance : Boucle ou spirale
- Capacitance : interdigital ou MIM (Metal-Insulator-Metal)
- Résistance : GaAs ou métal

Éléments passifs

- Tous les éléments passifs ont des impédances parasites. Ce sont des résistances, capacitances ou inductances non désirées qui affectent la performance des éléments.
- On verra les circuits équivalents des éléments passifs, et comment approximer la valeur des parasites.

Ligne microruban (*microstrip*)



On peut approximer l'inductance et la capacitance de la ligne par :

$$\bar{L} = \frac{Z_0}{c} \sqrt{\epsilon_e} \text{ [H/m]}$$

$$\bar{C} = \frac{\sqrt{\epsilon_e}}{cZ_0} \text{ [F/m]}$$

Ceci permet aussi d'approximer l'inductance et la capacitance parasites de d'autres éléments dont la forme est simple.

Ligne microruban : limites

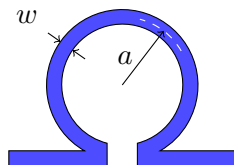
- Il y a 2 limites d'utilisation : largeur maximale de la ligne et épaisseur maximale du substrat.
- Selon l'épaisseur du substrat, il y a couplage avec un mode TM (mode de surface) si la fréquence est trop élevée :

$$f_s = \frac{c}{2\pi h} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r - 1}} \tan^{-1}(\epsilon_r)$$

- Selon la largeur du conducteur, il y a couplage avec un mode TE (mode transversal) si la fréquence est trop élevée :

$$f_t = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{(w + 0.4h)}$$

Inductance à boucle

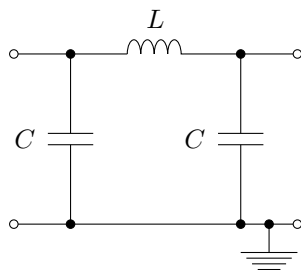


L'inductance est (approximativement) :

$$L = 12.57a \frac{\ln\left(\frac{8\pi a}{w}\right) - 2}{1 + 5.2a} \text{ [nH]}$$

où a est le rayon moyen (en cm) et w est la largeur du conducteur (en cm).

Inductance à boucle : circuit équivalent



La capacitance parasite est :

$$C = \pi a \bar{C}$$

La fréquence de résonance est :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.5LC}}$$

Inductance à boucle : exemple

Soit une inductance à boucle où $a = 200\mu\text{m}$ et $w = 10\mu\text{m}$. Calculer l'inductance et la fréquence de résonance, si le substrat a $100\mu\text{m}$ d'épaisseur, en GaAs.

$$L = 12.57a \frac{\ln\left(\frac{8\pi a}{w} - 2\right)}{1 + 5.2a} = 0.96 \text{ nH}$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w}} = 7.49$$

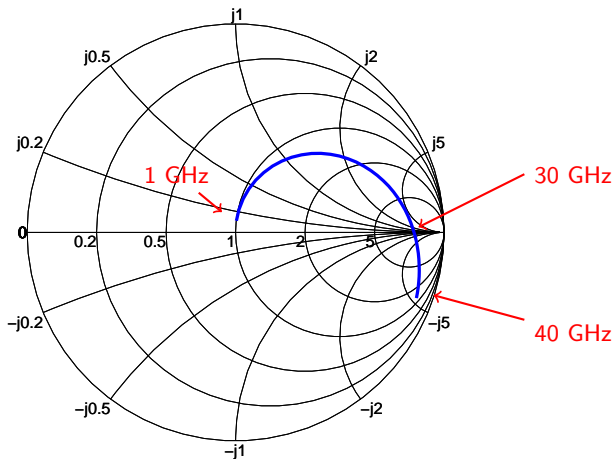
$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right) = 96.07\Omega$$

$$\bar{C} = \frac{\sqrt{\epsilon_e}}{cZ_0} = 94.96 \text{ pF/m}$$

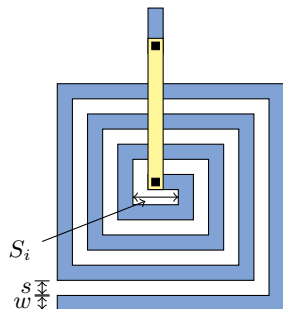
$$C = \pi a \bar{C} = 59.66 \text{ fF}$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.5LC}} = 29.74 \text{ GHz}$$

Inductance à boucle : exemple



Inductance spirale



Quelques paramètres :

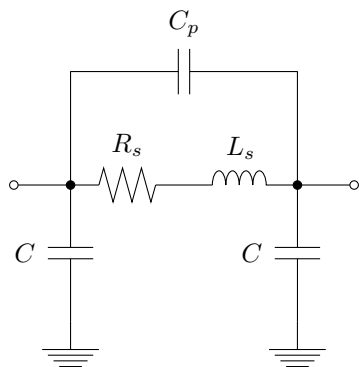
- N est le nombre de tours
- $p = s + w$ (en μm)
- S est donné par :

$$S = S_i + N(s + w)$$

L'inductance est (approximativement) :

$$L = \frac{8N^2S}{10000} \left[\ln \left(\frac{S}{Np} \right) + 0.726 + 0.178 \left(\frac{Np}{S} \right) + \frac{1}{8} \left(\frac{Np}{S} \right)^2 \right] \text{ [nH]}$$

Inductance spirale : circuit équivalent



La capacitance parallèle est :

$$C_p = \epsilon_e(4S + p) \left(13.1654 + 6.2438 \left(\frac{w}{s} \right) - 0.3188 \left(\frac{w}{s} \right)^2 \right) \text{ [fF]}$$

La capacitance parasite est :

$$C = 4S\overline{C'}$$

où $\overline{C'}$ est la capacitance par unité calculée si le conducteur a une largeur de $N(s + w)$.

La fréquence de résonance est :

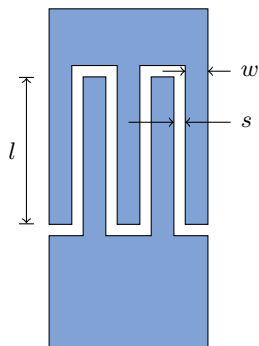
$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_p + 0.5C_a)}}$$

Condensateurs

Deux types de condensateurs :

- **Interdigital** : utilisé pour des faibles valeurs ayant une grande précision. On s'en sert pour $C < 1\text{pF}$.
- **MIM** : *Metal-Insulator-Metal*, plus grande valeur, mais moins précis lors de la fabrication. Peut être utilisé jusqu'à 10pF environ. La tolérance est typiquement $\pm 5\%$.

Condensateur interdigital



La capacitance est (approximativement) :

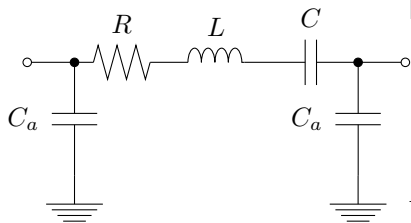
$$C = \frac{\epsilon_e \times 10^{-3}}{18\pi} \frac{K(k)}{K(k')} (n - 1) l \text{ [pF]}$$

où

$$k = \tan^2 \left(\frac{w\pi}{4(w + s)} \right)$$

et n est le nombre de doigts.

Condensateur interdigital : circuit équivalent



La capacitance parasite est :

$$C_a = 0.00111 \left(\frac{\sqrt{\epsilon_e}}{Z_0} - 0.034 \frac{w}{h} \right) l \text{ [pF]}$$

L est calculé en supposant que le condensateur est un conducteur de largeur $n(s + w)$.

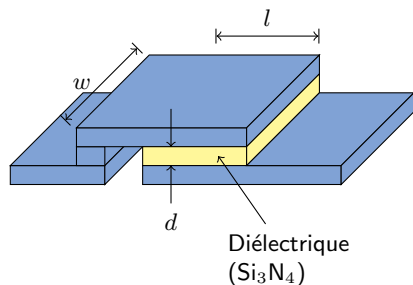
La fréquence de résonance est :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{2}{C_a} - \frac{1}{C} \right)}$$

R est :

$$R = \frac{4 R_{sl}}{3 nw}$$

Condensateur MIM



La capacitance est :

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 w l}{d}$$

Le circuit équivalent est le même que le condensateur interdigital. Il faut juste calculer R selon :

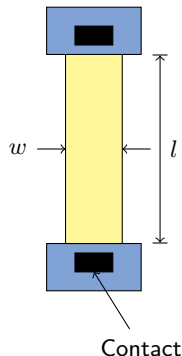
$$R = \frac{R_s l}{w}$$

Résistances

Il y a 2 méthodes principales pour fabriquer des résistances :

- **Dans le substrat** : on dope une partie du substrat en GaAs pour en faire une résistance.
- **Nichrome (NiCr)** : on utilise un métal pour produire la résistance. Donne une plus petite résistance que celle au GaAs, mais est plus stable à long terme.

Résistances



La résistance est :

$$R = \frac{\rho l}{wt} + \frac{2\rho_c}{w}$$

où t est l'épaisseur du métal, et ρ_c est la résistivité du contact entre la résistance et le conducteur.

Les résistances ont généralement une épaisseur fixe. On combine le rapport $\rho/t = R_{\square}$

$$R = R_{\square} \frac{l}{w} + \frac{2\rho_c}{w}$$

Résistances

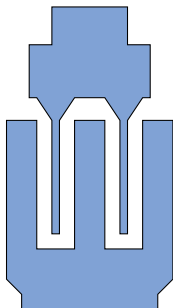
Propriété	GaAs	NiCr
Résistivité (R_{\square})	300 – 400 Ω/\square	10 – 100 Ω/\square
Précision	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
Stabilité	Faible	Bonne

Tension maximale : à cause d'effets non-linéaires, la tension est limitée à 75mV/ μm de longueur sur des résistances GaAs.

Diode Schottky

- Créée par une barrière métal-semiconducteur. Le semiconducteur est dopé n .
- Le comportement est semblable à une diode normale (jonction pn).
- La diode Schottky est beaucoup plus rapide que la diode pn .
- Sur du silicium, la tension seuil est de 0.3 à 0.5V. Sur du GaAs, c'est environ 0.7V.

Diode Schottky



Le courant est :

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{v}{n v_T}} - 1 \right)$$

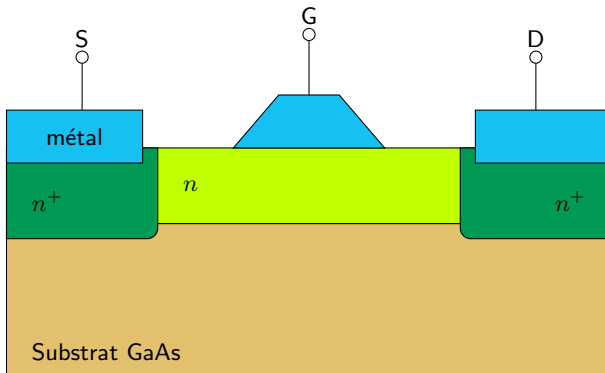
où I_0 est le courant de saturation, n est l'exponentiel de la courbe caractéristique ($n = 1 - 1.2$), et v_T est la tension thermique, 25mV à 290K.

MESFET

- Le MESFET est le transistor le plus utilisé dans les circuits intégrés hyperfréquences.
- Le fonctionnement est similaire à celui du MOSFET ; la différence principale est le mécanisme qui cause la saturation. La saturation de vitesse des électrons est le phénomène principal de saturation.
- Il n'existe que des transistors de type n .

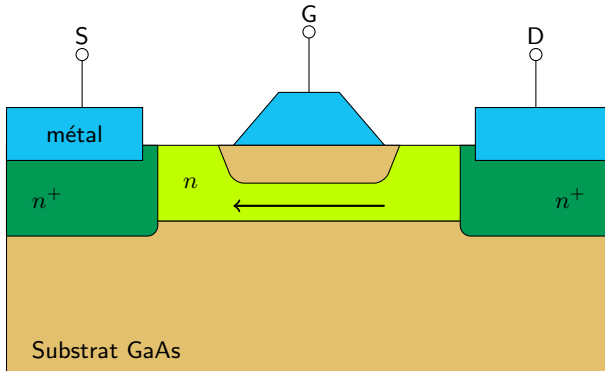
MESFET

La structure de base du MESFET est très semblable à celle du MOSFET.



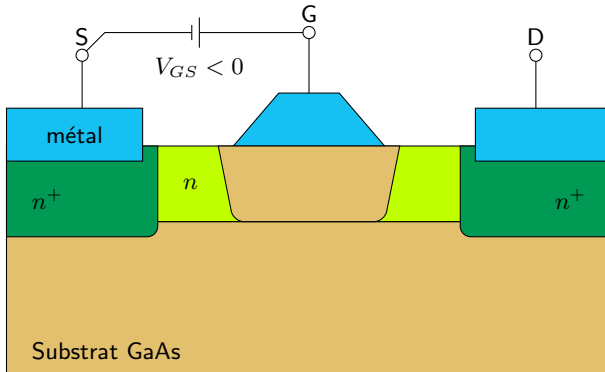
MESFET

La jonction métal-semiconducteur à la grille crée une zone appauvrie. Avec $V_{DS} > 0$, un courant circule.



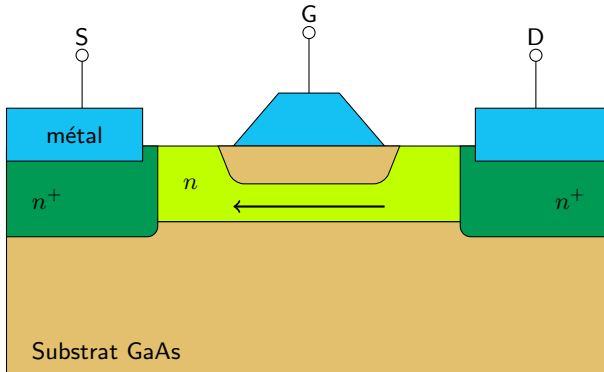
MESFET

Pour bloquer le courant, il faut appliquer $V_{GS} < 0$, afin d'augmenter la hauteur de la zone appauvrie.



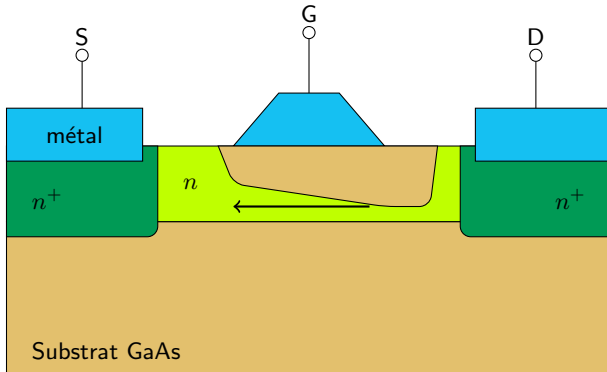
MESFET

Avec $0 < V_{DS} < 0.4V$ environ, un courant circule de façon linéaire. Si $V_{DS} > 0.4V$, les électrons atteignent leur vitesse de saturation.



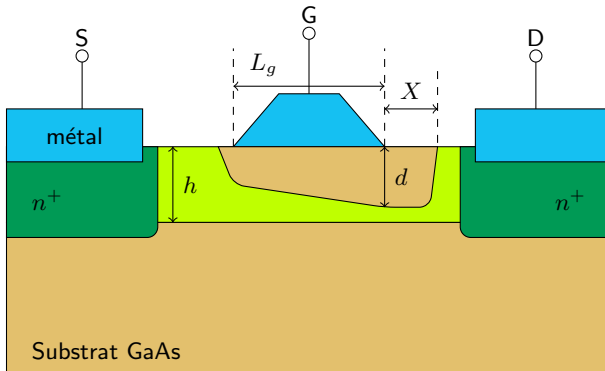
MESFET

Parce que le drain est plus positif que la source, la zone appauvrie est plus large du côté du drain.

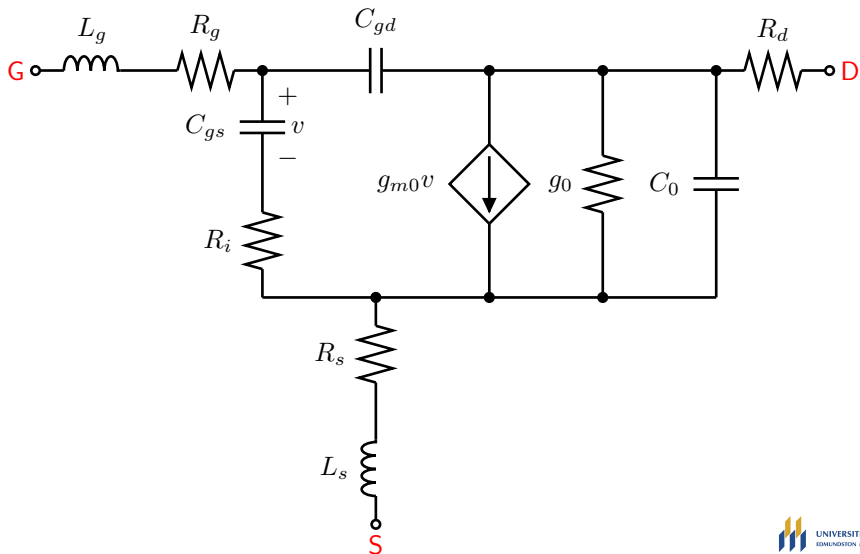


MESFET

On peut maintenant définir les termes qui vont définir les équations de fonctionnement du MESFET. Il y a aussi W_g , la largeur de la grille.



Circuit équivalent



MESFET : équations

d : épaisseur de la zone appauvrie

$$d = \left[\frac{2\epsilon(V_{B0} - V_{GS})}{dN} \right]^{\frac{1}{2}}$$

X : longueur de la zone d'extension

$$X = \left[\frac{2\epsilon}{qN(V_{B0} - V_{GS})} \right]^{\frac{1}{2}} (V_{B0} + V_{DG})$$

g_{m0} : transconductance

$$g_{m0} = \frac{\epsilon\nu_{sat}W_G}{d}$$

La tension V_{B0} représente la chute de tension due à la zone d (0.8V).

C_{gc} : capacitance grille-canal

$$C_{gc} = \frac{\epsilon W_G L_G}{d} \left(1 + \frac{X}{2L_G} - \frac{2d}{L_G + 2X} \right)$$

C_{gd} : capacitance grille-drain

$$C_{gd} = \frac{2\epsilon W_G}{1 + 2X/L_G}$$

R_i : résistance intrinsèque

$$R_i = \frac{\nu_{sat}L_G}{\mu_m I_{CH}}$$

MESFET : équations

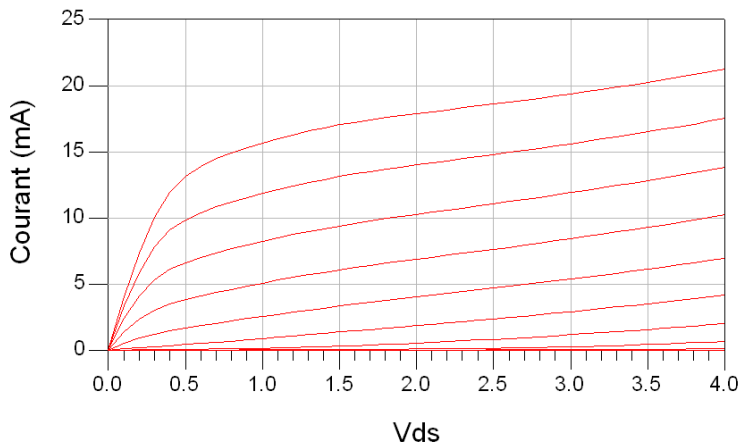
Courant dans le canal :

$$I_{CH} \approx I_D = qN\nu_{sat}(h - d)W_G$$

Les résistances R_S , R_D et R_G sont typiquement de l'ordre de 2 à 3Ω .

Ces équations ne sont valides que pour un transistor en saturation.

MESFET : courbe I-V typique

MESFET sur GaAs, $4 \times 20 \mu\text{m}$

MESFET : figure de bruit

- La figure minimale de bruit est obtenu selon :

$$F_{min} = 1 + 2\omega \frac{C_{gc}}{g_{m0}} \left(\frac{R_S + R_G}{R_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- Cette équation varie selon le courant de polarisation, puisque R_i dépend de I_{CH} .

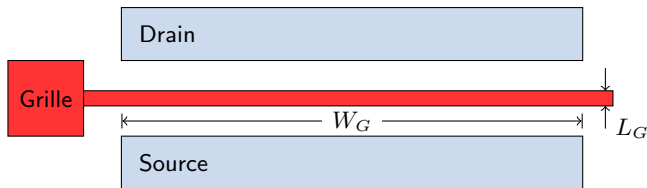
MESFET

- La fréquence de transition est :

$$f_T = \frac{g_{m0}}{2\pi(C_{gc} + C_{gd})}$$

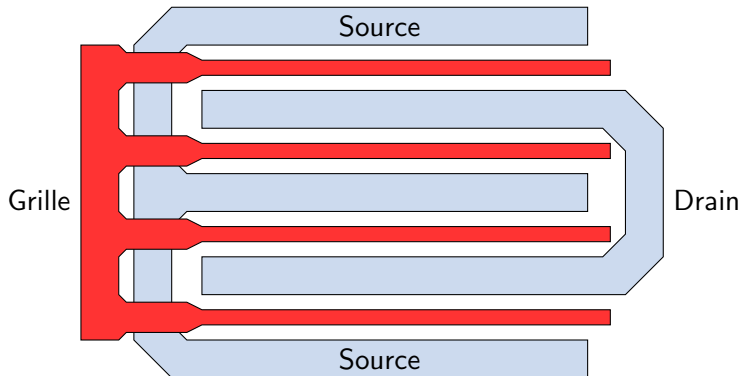
MESFET : topologie

- Un MESFET a typiquement plus d'une grille, source et drain.
- Si la grille est trop longue, il existe un délai entre le début de la grille et la fin de la grille.
- Topologie standard :



MESFET : topologie

FET à 4 doigts : réduit la résistance et le délai.



MESFET : topologie

- Un FET avec m doigts de longueur W'_G se comporte de la même façon qu'un FET ayant un seul doigt de longueur mW'_G .
- La résistance de grille est :

$$R_g = \frac{\rho W_G}{3m^2 t L_g}$$

où ρ est la conductivité du métal de la grille, et t est l'épaisseur de la grille (typiquement $1.5\mu\text{m}$).

- La résistance de grille à DC est 3 fois plus élevée que la résistance donnée ci-haut.

Processus de fabrication : limites

- Chaque fabricant de circuits intégrés a ses propres limites de fabrication.
- Il peut y avoir une grande différence entre les paramètres des différents fabricants.
- De plus, lors de la fabrication, certains paramètres peuvent varier.
Ex : 10% de variation sur la valeur d'un condensateur.
- Plus un procédé est précis, plus il est dispendieux.

Processus de fabrication

Élément	Limite	Limite de dimension	Valeur de design
Résistance GaAs	75mV/ μm de longueur	$L > 3\mu\text{m}$, $W > 4\mu\text{m}$	250 Ω / \square
Résistance NiCr	0.2mA/ μm de largeur	$L > 6\mu\text{m}$, $W > 5\mu\text{m}$	40 Ω / \square
Capacitance MIM SiN	15V	10 $\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (min)	400pF/mm ²
Capacitance MIM SiN+SiO ₂	15V	10 $\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (min)	50pF/mm ²
Inductance spirale	6mA/ μm de largeur 3mA/ μm pour métal2	$5\mu\text{m} < w < 15\mu\text{m}$ $5\mu\text{m} < s < 15\mu\text{m}$	
Ligne de transmis- sion	6mA/ μm de largeur	$w > 3\mu\text{m}$	0.03 Ω / \square
FET	$0 < V_{ds} < 5\text{V}$ $-1.2 < V_{gs} < 0.6\text{V}$	$m < 10$, $10\mu\text{m} < W_u < 50\mu\text{m}$	

Exemple de procédé de fabrication.

Conclusion

Les points clés de ce chapitre sont :

- Calcul des éléments passifs : résistances, inductances, capacitances.
- Calcul des parasites.
- Principes de base du fonctionnement des MESFET.