

Électronique cryogénique à basse fréquence : JFET, MOSFET et HEMT

Yong JIN

yong.jin@lpn.cnrs.fr

<http://www.lpn.cnrs.fr/fr/PHYNANO/NanoFET.php>



DRTBT2012, La-Londe-les-Maures, le 21 - 25 mai 2012



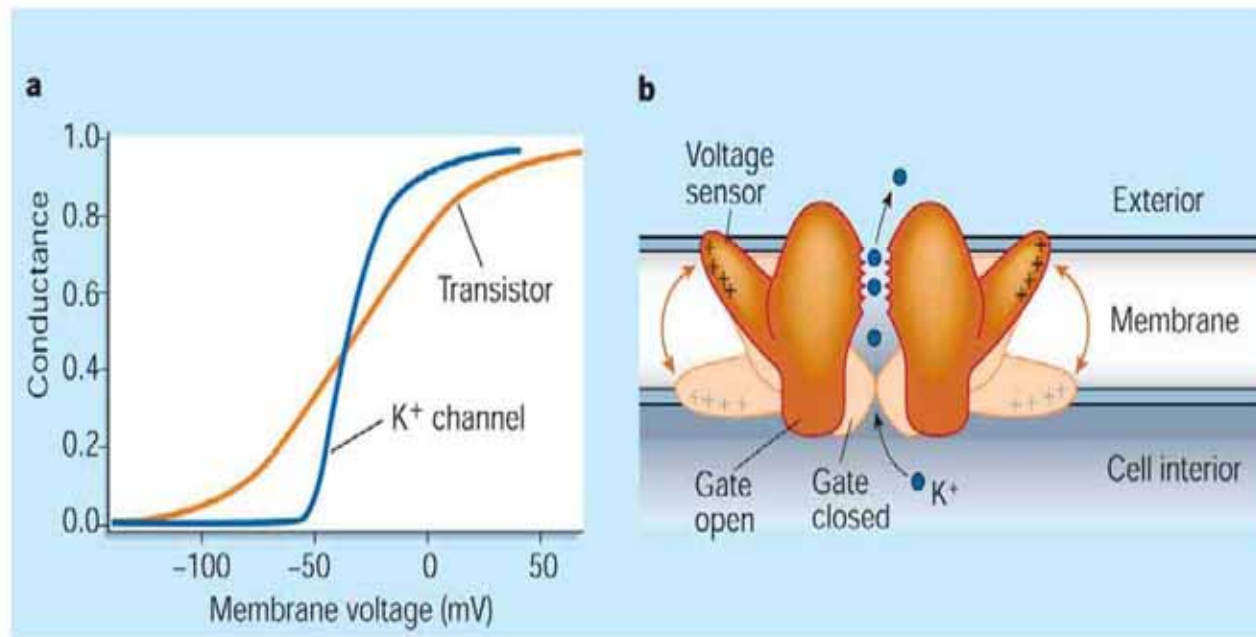
Plan

- **Essentiel des FETs (Field-Effect Transistors)**
 - principe de fonctionnement et divers paramètres
- **Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique**
 - bruits blancs
 - bruits colorés
 - comparaison entre JFET, MOSFET et HEMT
- **HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique**
 - expériences
 - bruit équivalent à l'entrée en tension à 1 kHz et capacité de grille
 - surplus de bruit et courant de fuite de grille
 - investigations en cours
- **Conclusions et perspectives**

Essentiel des FETs (transistors à effet de champ)

Préambule

« *Transistor vivant* »



Nature 423, 21 (2003)

Essentiel des FETs (transistors à effet de champ)

Historique

- Triode à tube (L. de Forest 1906) **Amplification !**
- Point Contact Transistor (J. Bardeen, W. Brattain et W. Shockley 1947)
- Circuit intégré (J. Kilby 1959)
- MOSFET Si (1959)

Recherches pour augmenter les performances

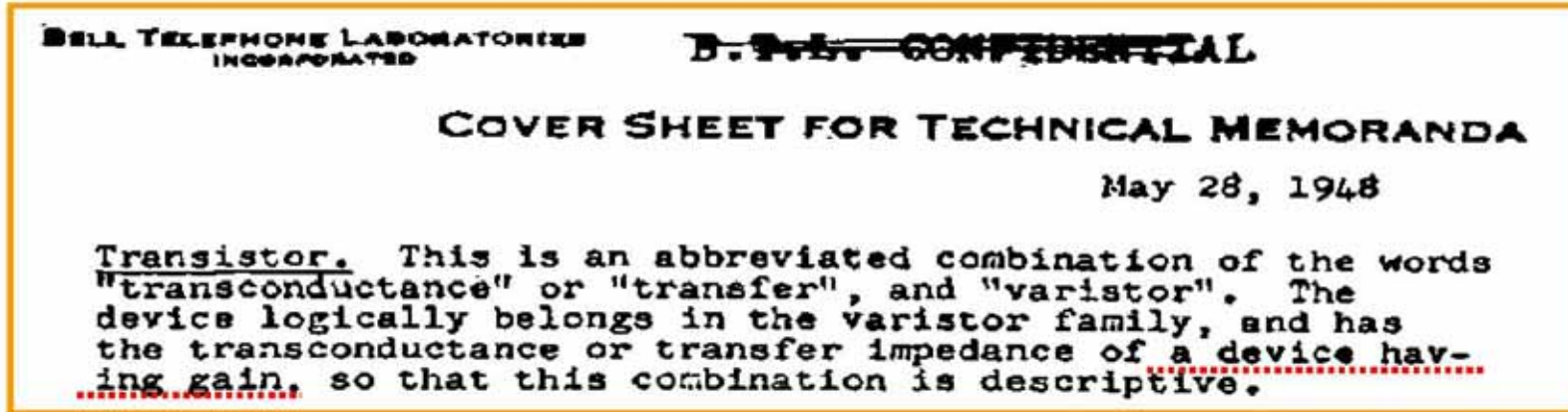
- Nanofabrication : réduction de la taille de grille du MOSFET (de 2μ à $< 100\text{nm}$)
- Amélioration des matériaux par MBE (1968)
- 2DEG et HEMT GaAs (1980)

Recherches des nouvelles propriétés de transport d'électrons

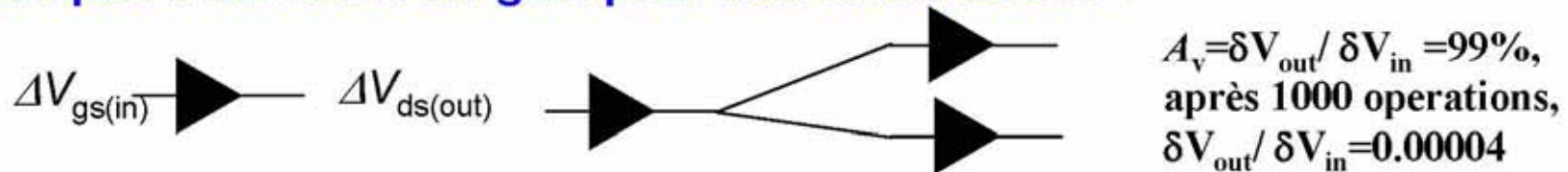
- Transport balistique d'électrons ➔ Physique Mésoscopique (depuis les années 80)
- ➔ **Transistor entièrement balistique *Appl. Phys. Lett. 97, 233505 (2010)***

Essentiel des FETs (transistors à effet de champ)

- Étymologie du transistor



- Pourquoi il faut avoir un gain pour être un transistor ?



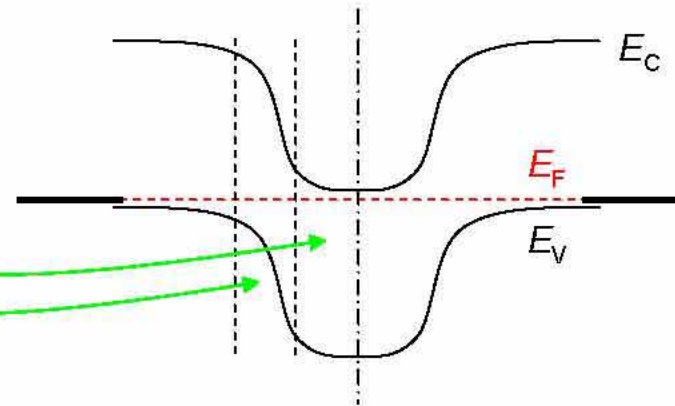
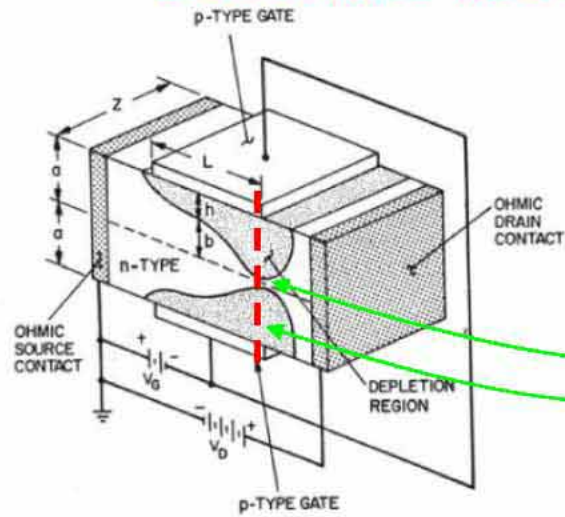
- Transistor à effet de champ (FET : Field-Effect Transistor)

Amplification ou ayant un gain en tension $A_v > 1$

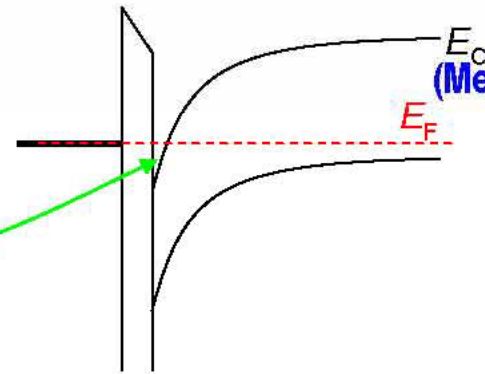
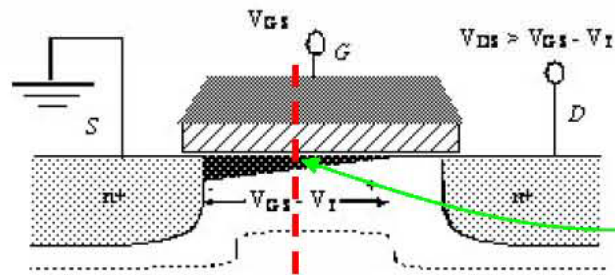
Isolation entre la sortie et l'entrée

Rev. Mod. Phys, 71, S336 (1999)

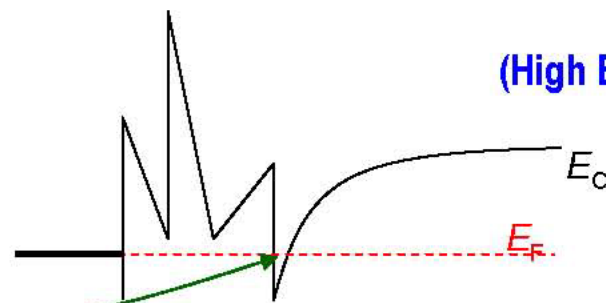
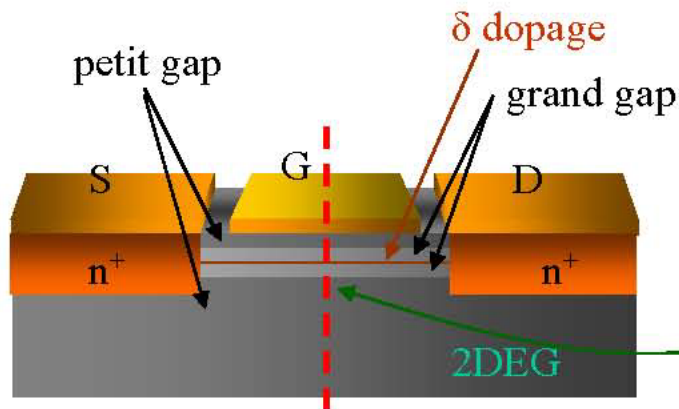
Essentiel des FETs (transistors à effet de champ)



JFET
(Junction FET)
grille // P-N



MOSFET
(Metal-Oxide-Semiconductor FET)
grille // couche oxydée

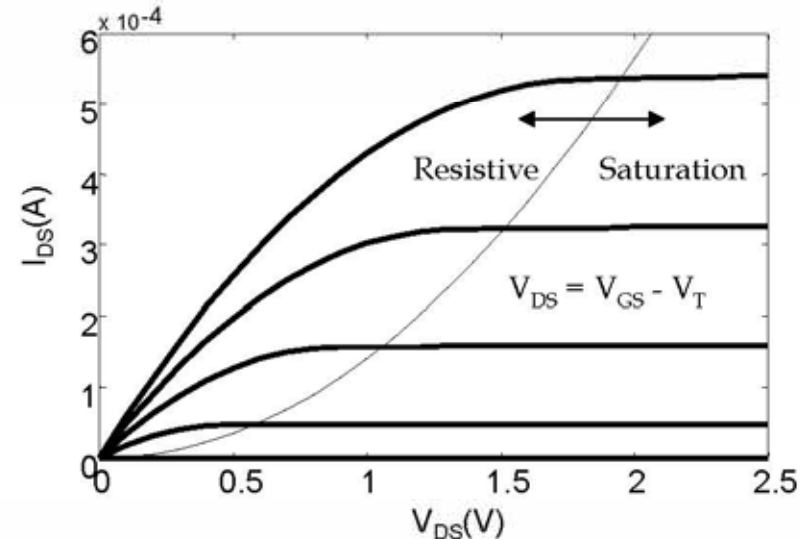
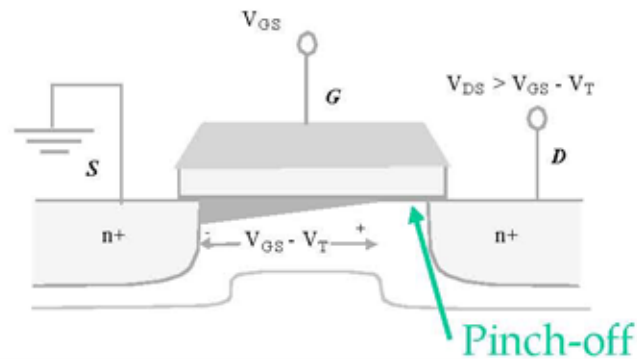


HEMT
(High Electron Mobility Transistor)
grille // grand gap

Essentiel des FETs (transistors à effet de champ)

- principe de fonctionnement et divers paramètres

Exemple: MOSFET



Transconductance: $g_m = \partial I_{ds} / \partial V_{gs} \sim$ modulation \leftrightarrow grille isolée

Conductance de sortie: $g_d = \partial I_{ds} / \partial V_{ds} \sim$ saturation \leftrightarrow bande interdite

Gain en tension: $A_V = \partial V_{ds} / \partial V_{gs} = g_m / g_d > 1 \Rightarrow \nearrow g_m + \searrow g_d$

Gain en courant et en puissance:

*Discussion détaillée dans l'info supplémentaire: **Appl. Phys. Lett. 97, 233505 (2010)***

Capacité: C_{gs}, C_{gd}

Bruits électroniques

Plan

- Essentiel des FETs (Field-Effect Transistors)
 - principe de fonctionnement et divers paramètres
- Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique
 - bruits blancs
 - bruits colorés
 - comparaison entre JFET, MOSFET et HEMT
- HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique
 - expériences
 - bruit équivalent à l'entrée en tension à 1 kHz et capacité de grille
 - surplus de bruit et courant de fuite de grille
 - investigations en cours
- Conclusions et perspectives

Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique

Rappel:

- La variance et la densité spectrale de puissance (PSD)

$$\sigma_x^2 = \overline{\Delta X^2} = \overline{(X - \bar{X})^2} = \int_0^\infty S_x(f) df$$

Bruits blancs

- Bruit thermique $S_V = 4 k_B T R$

- Bruit de grenaille $S_I = 2 e I$

Bruits colorés

- Bruit de génération et recombinaison $S \sim 4 \overline{\Delta N^2} \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$

- Bruit $1/f^\beta$ $S_I = \frac{\alpha_H I^2}{N f^\gamma}$ (formule empirique par Hooge)

http://fr.wikipedia.org/wiki/Bruits_color%C3%A9s

A. van der Ziel, Noise in solid state devices and circuits, John wiley & sons (1986)

E. Milotti, 1/f noise: a pedagogical review. arxiv.org/pdf/physics/0204033

Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique

Bruits équivalent à l'entrée d'un FET

(amplificateur de tension avec la configuration source commune)

e_n : bruit équivalent en tension

i_n : bruit équivalent en courant

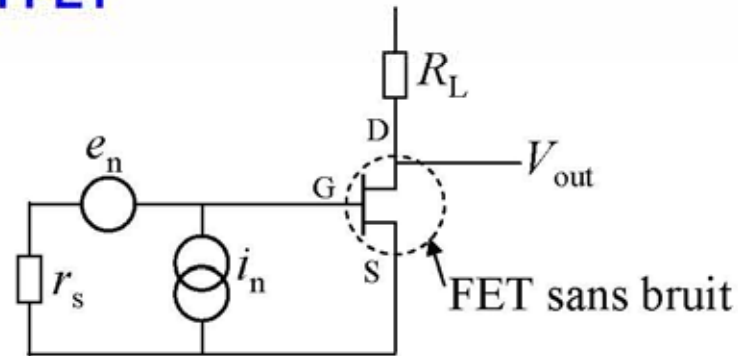
r_s : résistance de source

R_L : résistance de charge

V_{out} : bruit de sortie en tension

R_e : résistance de sortie effective $R_e = R_L / (1 + g_d R_L)$

A_v : gain en tension $A_v = g_m R_e = g_m R_L / (1 + g_d R_L)$,



Expérimentalement:

S_{vo} : PSD du bruit de sortie en tension peut être mesurée directement

S_{io} : PSD du bruit de sortie en courant peut être obtenue par S_{vo}/R_e^2

→ $e_n = \text{sqrt}(S_{vo}/A_v)$ (faible valeur r_s e.g., 50Ω)

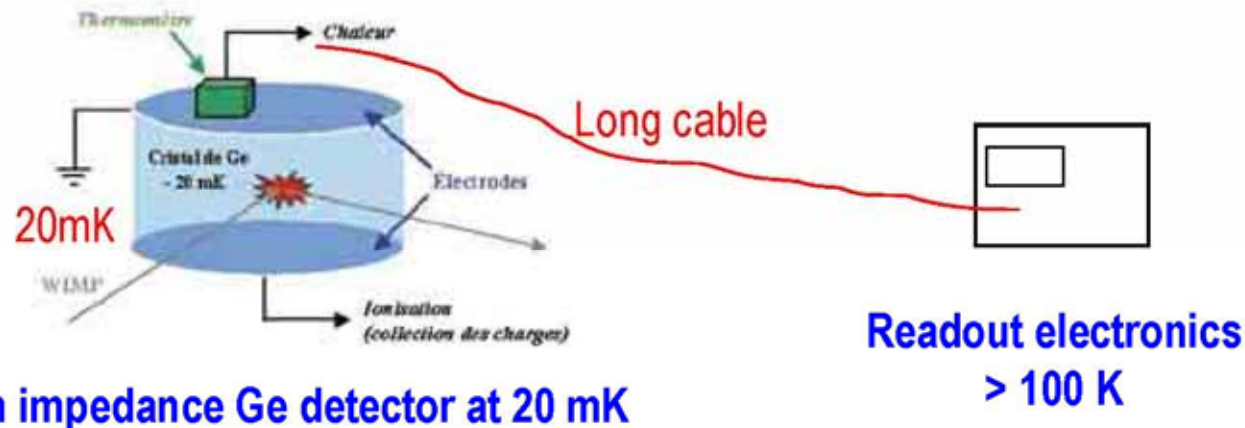
→ $i_n = e_n/r_s$: difficile à déterminer à cause de r_s .

Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique

Why cryogenic condition

For most ultra-sensitive detectors: low-temperature → low thermal noise
 $\sqrt{4kTR}$ → 50Ω: at 300 K ⇔ 0.9 nV/√(Hz); at 4.2 K ⇔ 0.1 nV/√(Hz)

Currently:



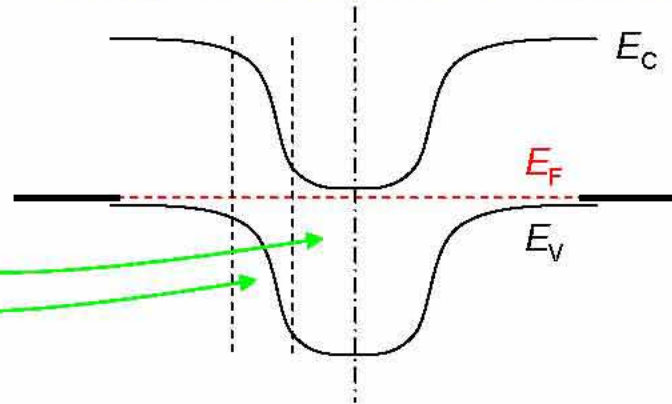
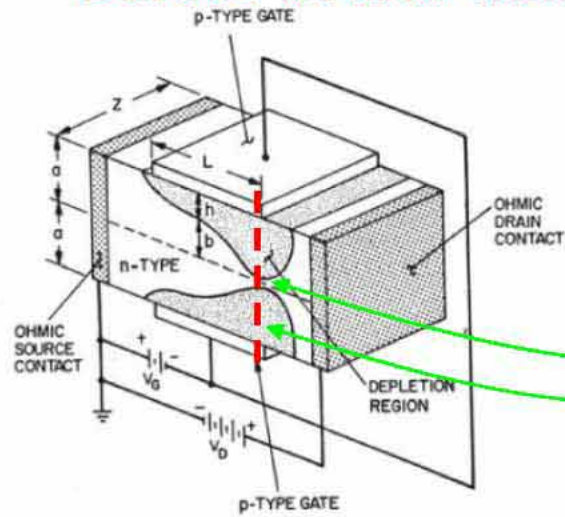
due to the long cable:

- High capacitance → limit time resolution
- Microphonic noise → limit the readable signal level

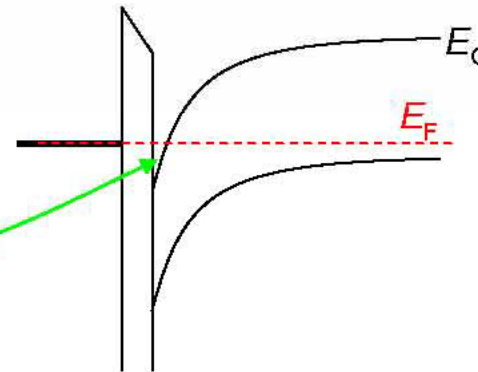
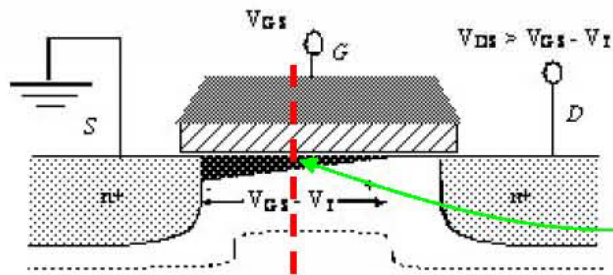
➔ High performance cryoelectronics for high impedance readout electronics
Low-temperature, low-power consumption and low frequency noise

Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique

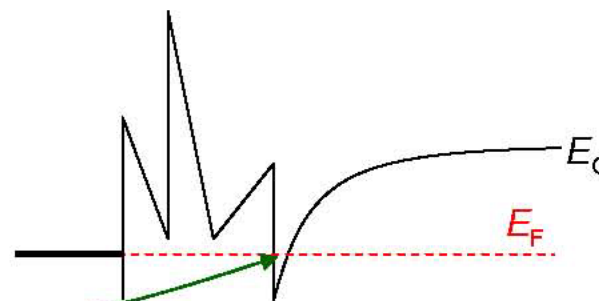
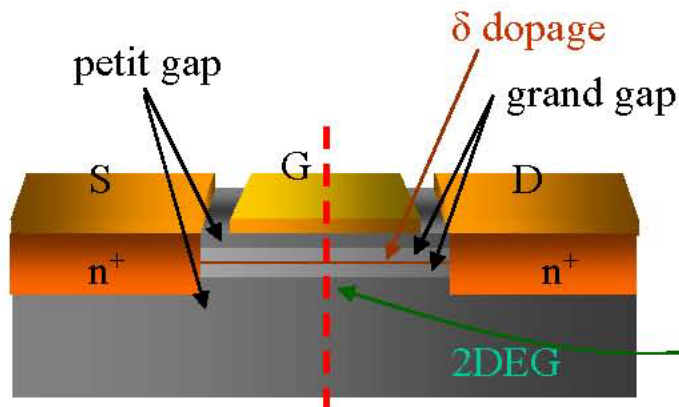
- comparaison entre JFET, MOSFET et HEMT



grille // P-N
faible bruit 1/f
 e⁻ non dégénérés
 gel à B.T.
 condition: T > 100K



grille // couche oxydée
fort bruit 1/f
 e⁻ dégénérés
 Sans limite de B.T.



grille // grand gap
Intrinsèquement faible bruit 1/f
 e⁻ dégénérés
 Sans limite de B.T.

Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique

À la température ≤ 4.2 K

Bruits blancs

- Bruit thermique $4 k_B T R$

- Bruit de grenaille $2 e I$

Bruits colorés

- Bruit de génération et recombinaison $4 \overline{\Delta N^2} \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$

- Bruit $1/f^\beta$ $\frac{\alpha_H I^2}{N f^\gamma}$ (formule empirique par Hooge)

Plan

- Essentiel des FETs (Field-Effect Transistors)
 - principe de fonctionnement et divers paramètres
- Divers bruits dans les FETs et condition cryogénique
 - bruits blancs
 - bruits colorés
 - comparaison entre JFET, MOSFET et HEMT
- **HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique**
 - **expériences**
 - **bruit équivalent à l'entrée en tension à 1 kHz et capacité de grille**
 - **surplus de bruit et courant de fuite de grille**
 - **investigations en cours**
- Conclusions et perspectives

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Moyens expérimentaux 1/3

CNRS/LPN

one of the key national nanofabrication centers

Fabrication

Clean room : 1000M²

Molecular Beam Epitaxy III-V : AlGaAs/GaAs, (Al,In)GaAs/GaAs, InGaAsP/InP

Lithography : **e-beam nanolithography**, Optical,
Focused Ion Beam nanolithography

Etching : Ion Beam Etching, Reactive Ion Etching

Metal film deposition : Au, Ni, Co, Pt, Ti, W, Nb, Cr, Al ...

Dielectric film deposition : Si, SiC, Si₃N₄, SiO₂, Al₂O₃ ...

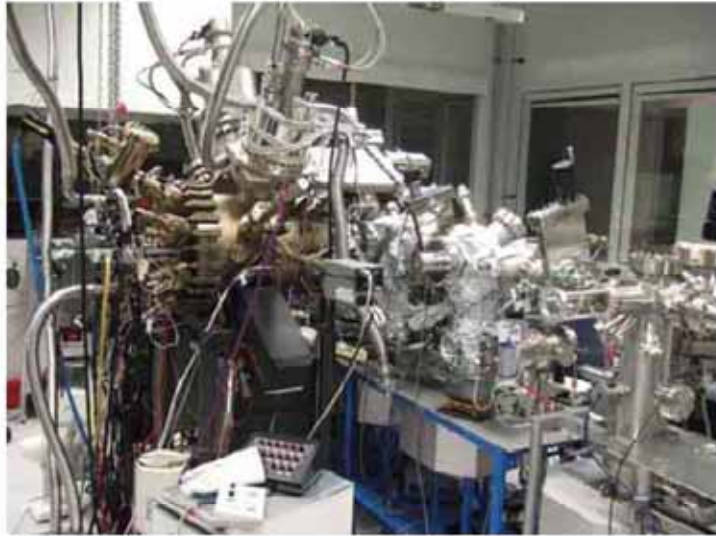
Packaging : MCP, bonding

Analysis and e-transport characterization

Transmission Electron Microscopy, X ray microscopy, STM, AFM, Low temperature and high vacuum STM, dilution cryostat with magnetic field, Hall effect, I-V, C(V), Noise spectrum analyzer ...

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Moyens expérimentaux 2/3



MBE Molecular Beam Epitaxy



EBL electron beam lithography



Ion etching systems



metallization systems

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Moyens expérimentaux 3/3

CNRS/LPN

~ 40 permanent researchers, ~ 40 permanent engineers, ~ 40 PhD&postdoc

Research topics

- Nanofabrications

materials by molecular beam epitaxy: quantum dot, quantum wire

nano-lithography

- Physics and nanostructured devices

quantum and coherent electronic transport

high performance cryoelectronics → for astrophysics

- Optoelectronics

- Quantum optics and nonlinear optics

- Micro fluidic

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Expériences: fabrication de matériau de base

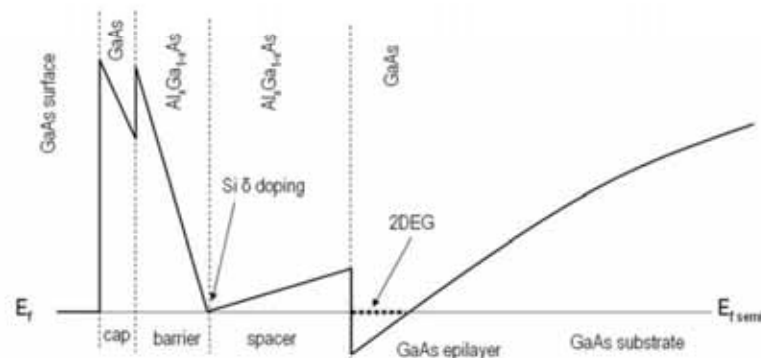
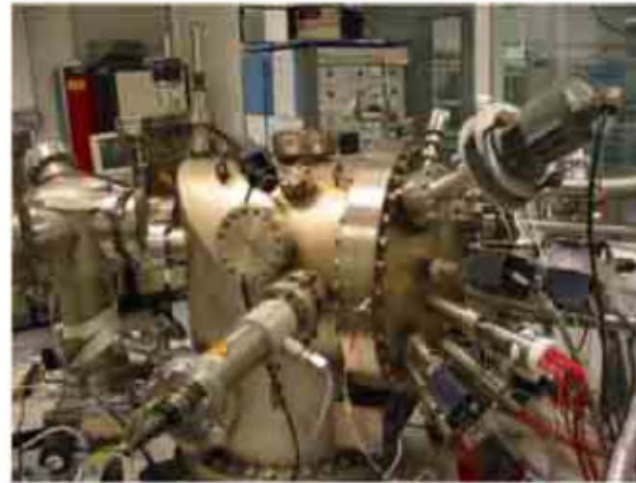
MBE and 2DEG

Initially: improve material quality

MBE (Molecular Beam Epitaxy)

Atomic level quality

Heterojunction AlGaAs/GaAs



2DEG (2-Dimensional Electron Gas)

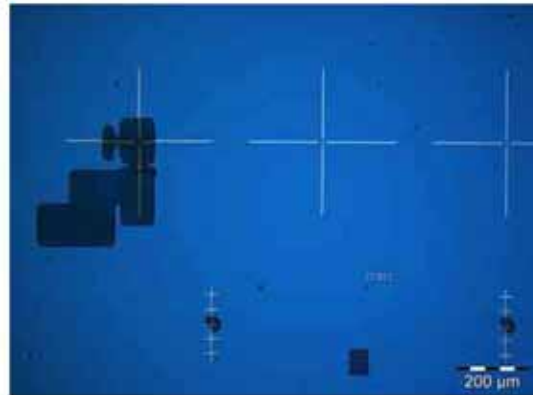
Degenerated electrons separated from donors

→ **no LT limit**, it can work at mK; very high mobility → mean free path $l > \mu\text{m}$

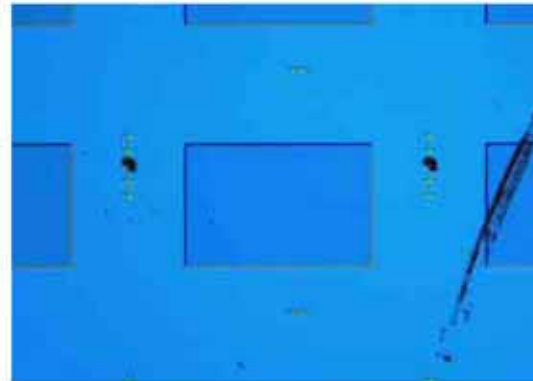
HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Expériences: fabrication par la lithographie électronique

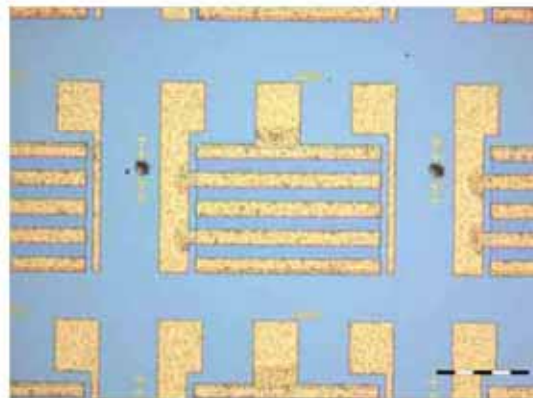
1. Marques d'alignement



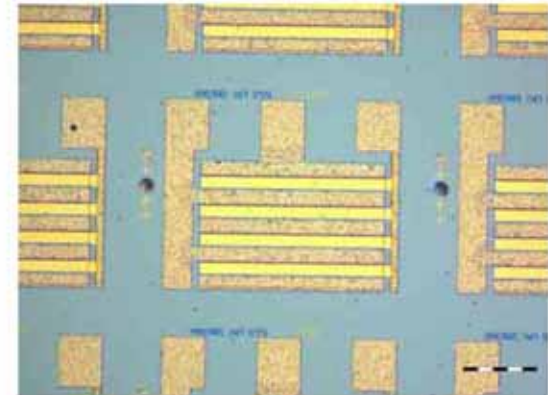
2. Mesa par gravure



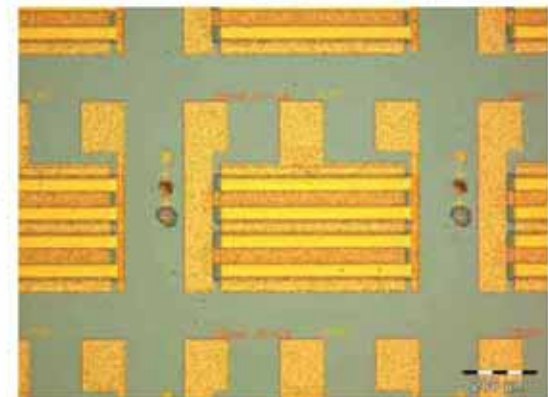
3. Source et drain par contact ohmique (métallisation et recuit rapide)



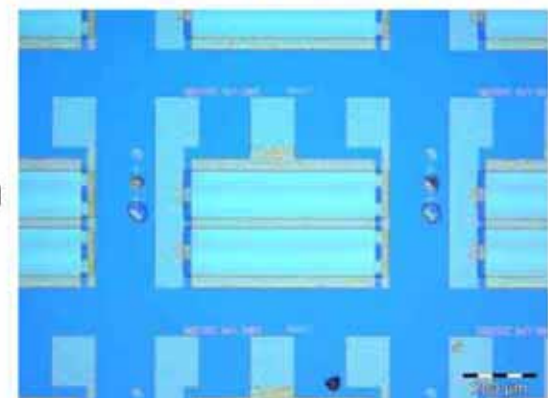
4. Grille par contact Schottky (métallisation)



5. Isolation entre les pistes

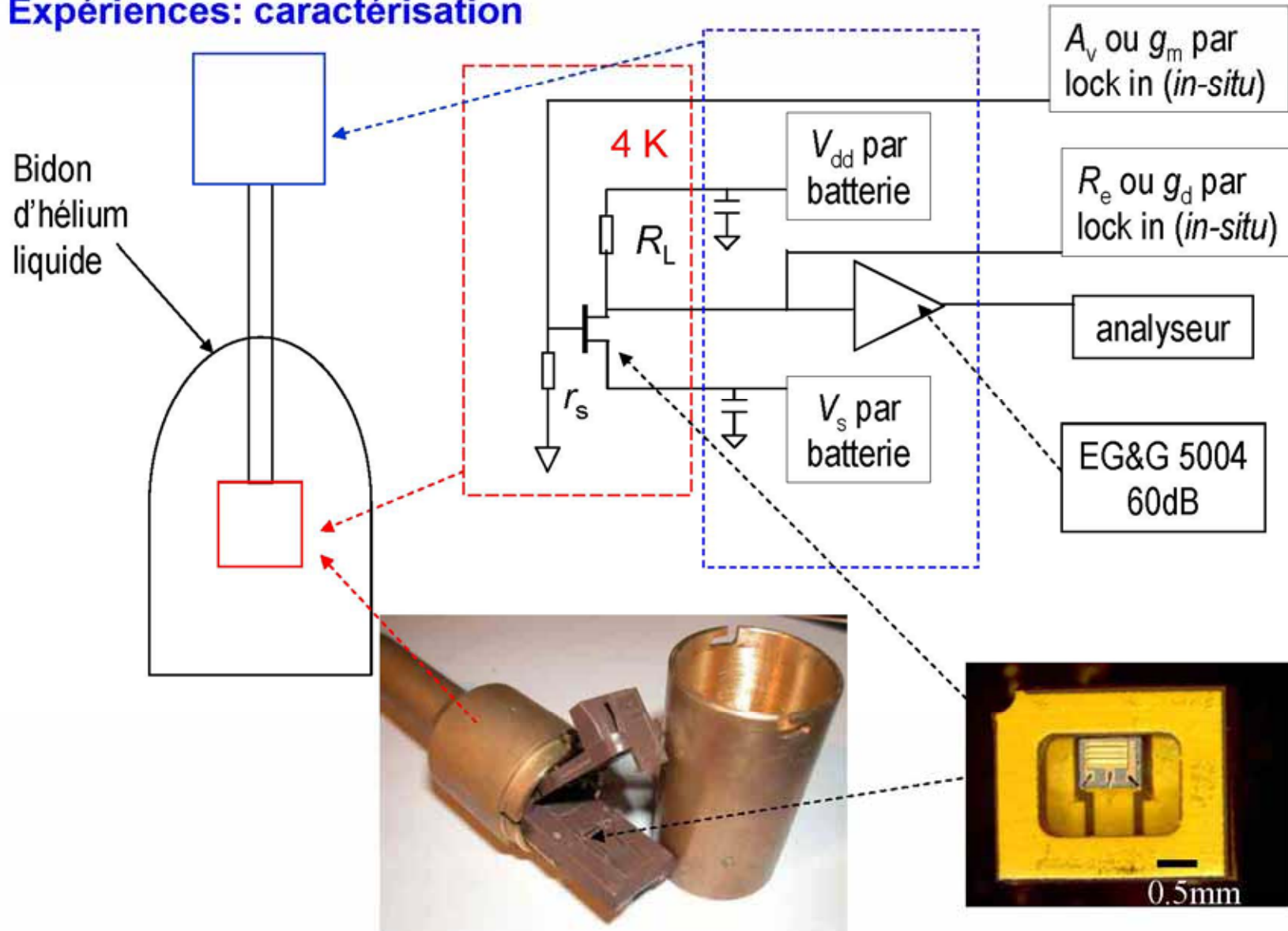


6. Interconnexion par métallisation



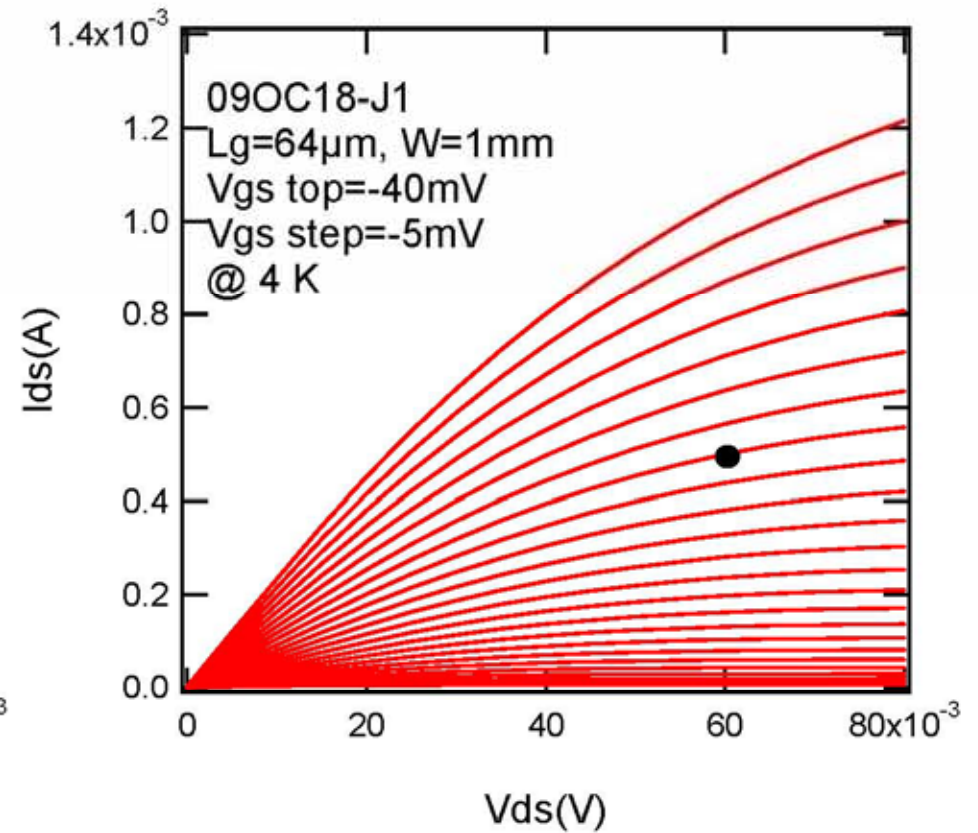
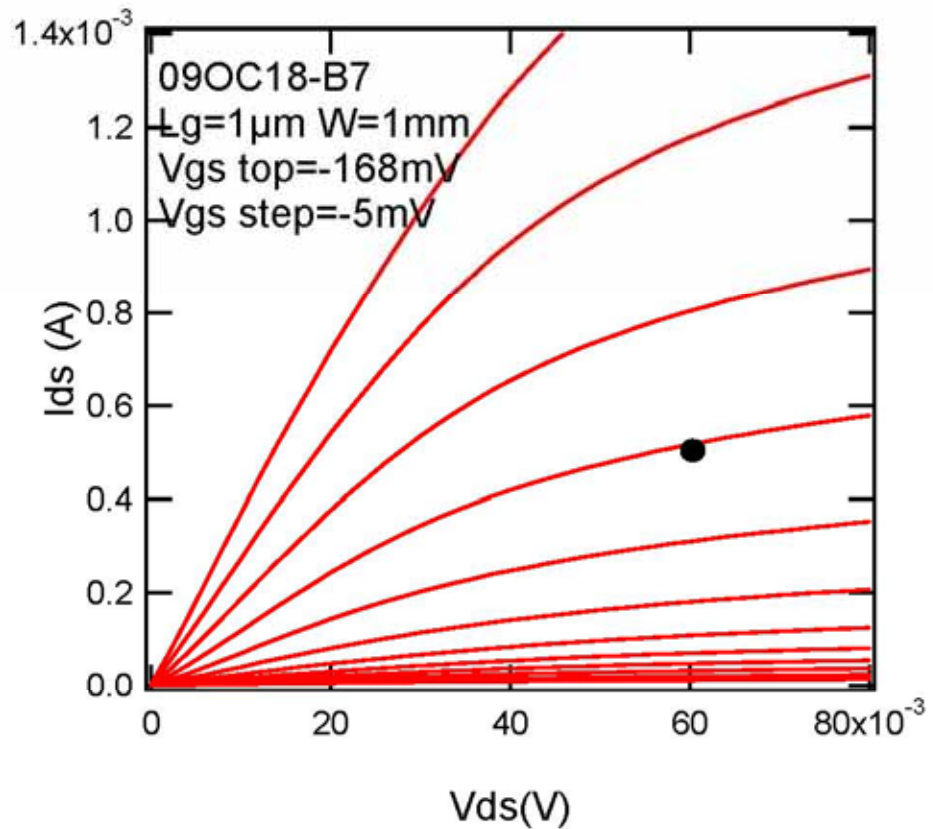
HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Expériences: caractérisation



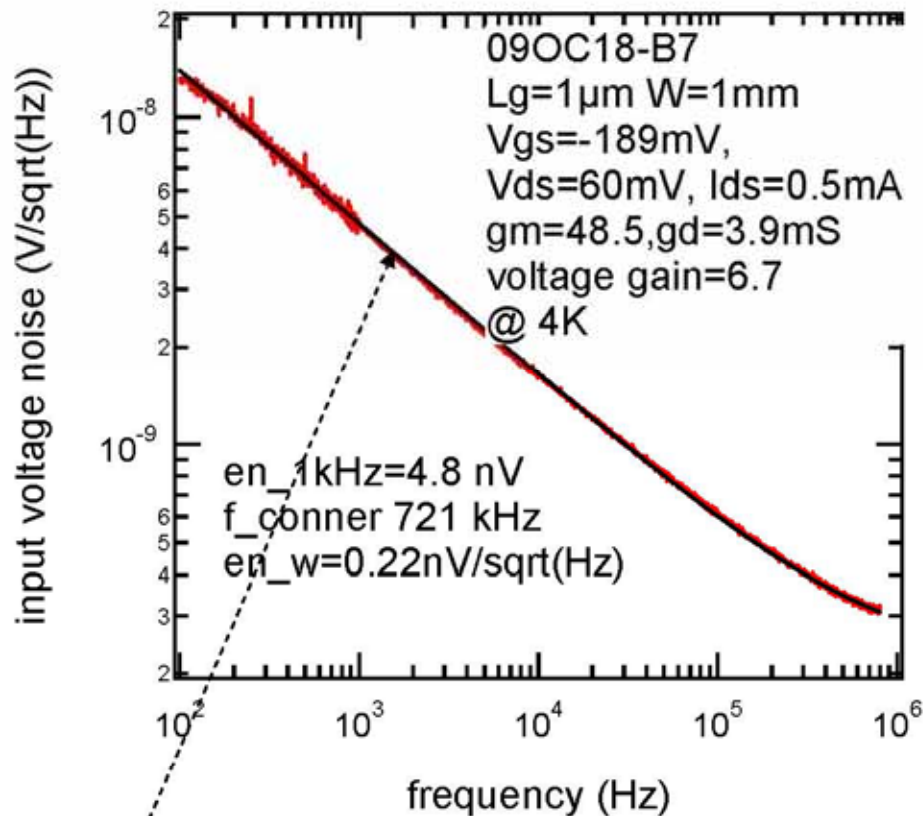
HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Expérience: caractéristiques $I_{ds}-V_{ds}$ à 4 K

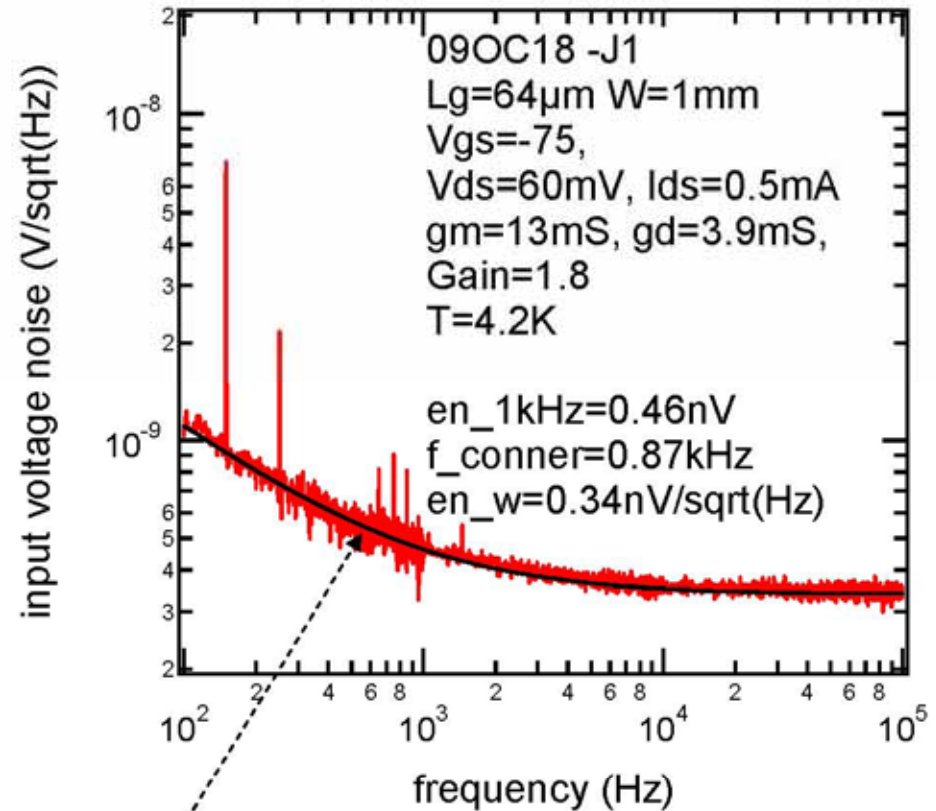


HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Expérience: caractéristiques de bruit à 4 K



$$e_n = \sqrt{5.0 \times 10^{-20} + 1.4 \times 10^{-14} / f^{0.93}}$$



$$e_n = \sqrt{6.2 \times 10^{-20} + 9.0 \times 10^{-16} / f^{0.95}}$$

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

bruit équivalent à l'entrée en tension à 1 kHz et capacité de grille

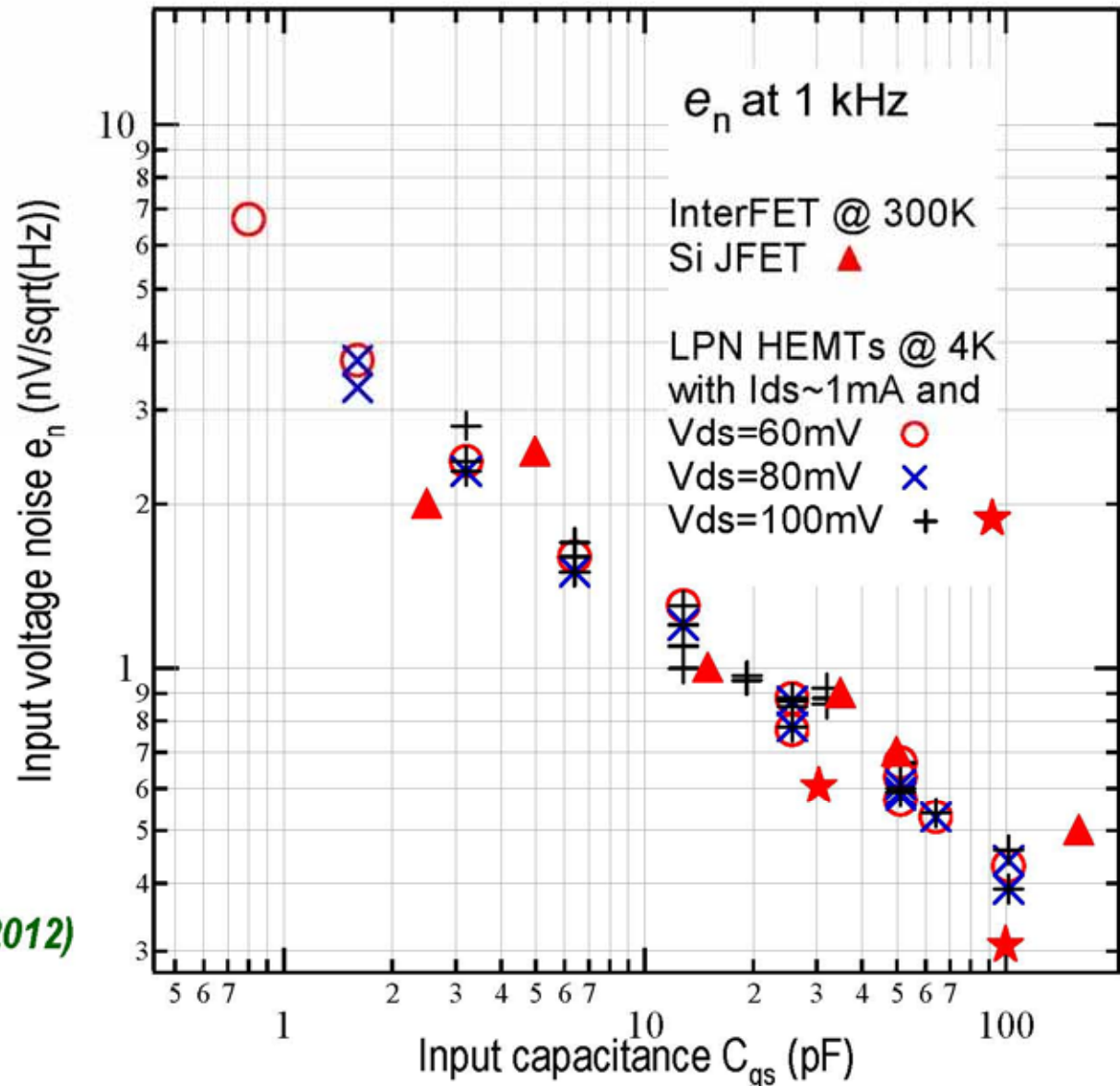
e_n à 1 kHz
en fonction de C_{gs} :
 $e_n \sim C_{gs}^{-1/2}$

Consumption:

Si JFETs de InterFET:
 10^{-3} to 10^{-2} W @ $T > 100$ K

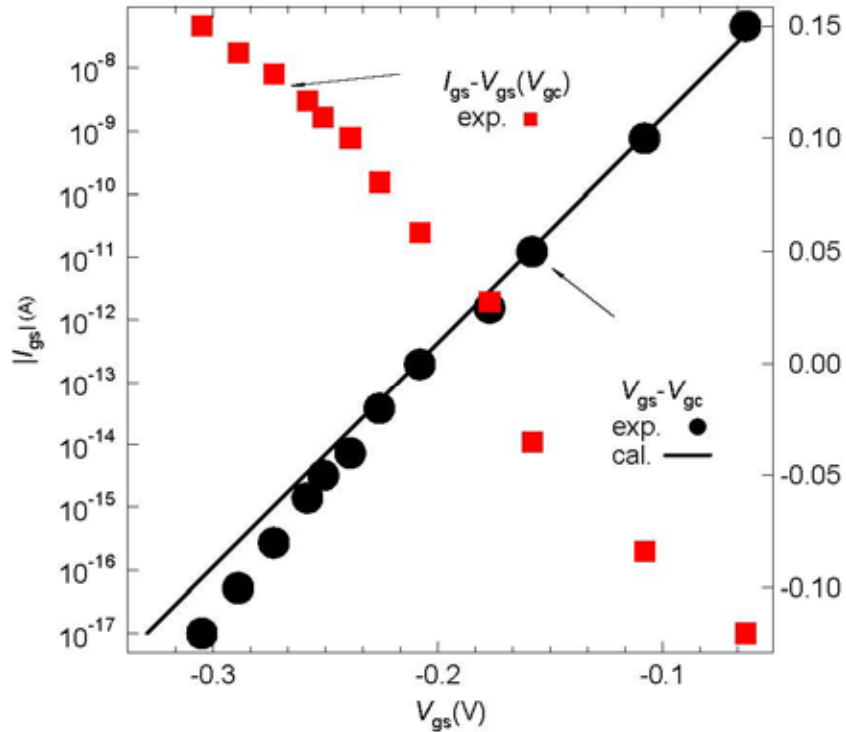
HEMTs du CNRS/LPN:
 10^{-5} to 10^{-4} W @ $T = 4$ K

J. Low Temp. Phys. 167, 626 (2012)

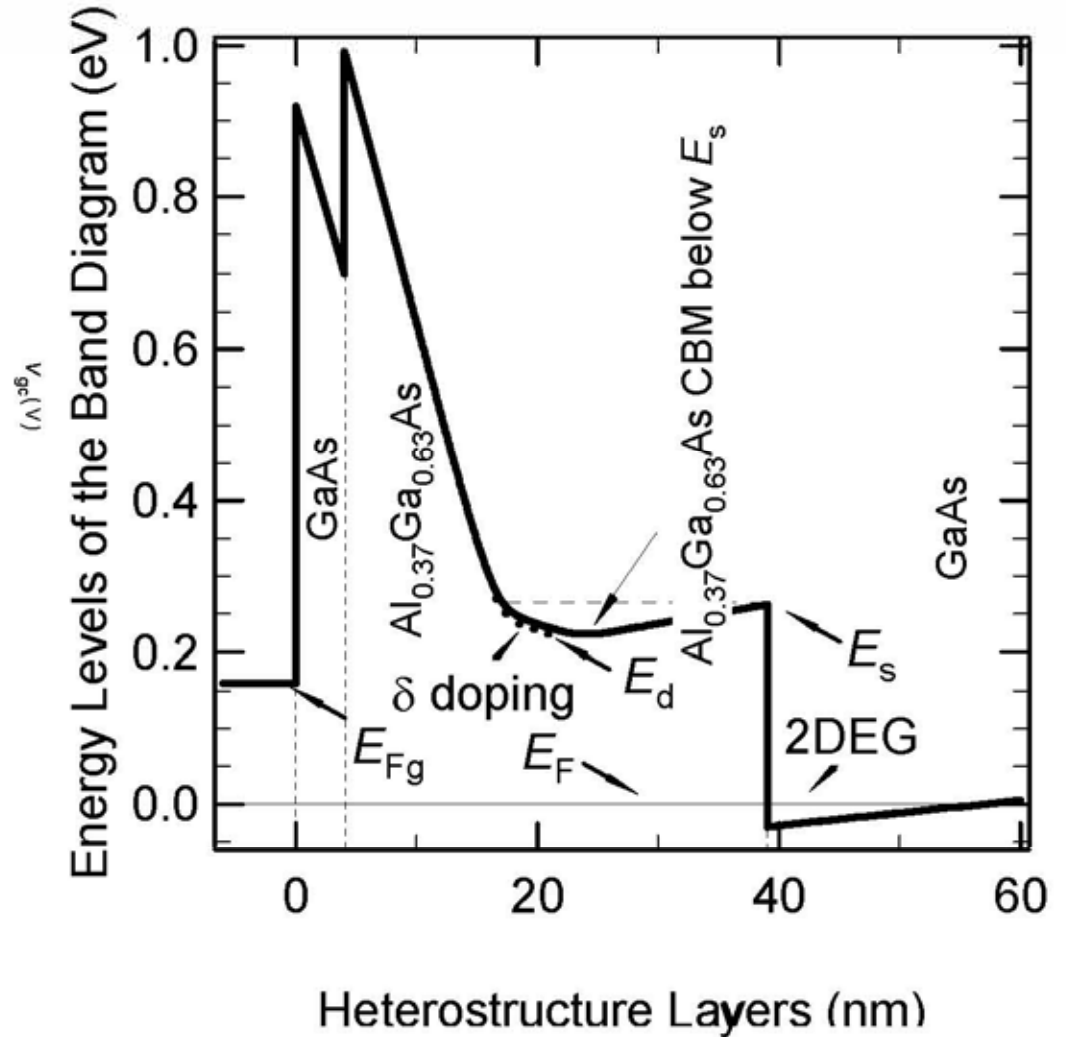


HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

surplus de bruit et courant de fuite de grille



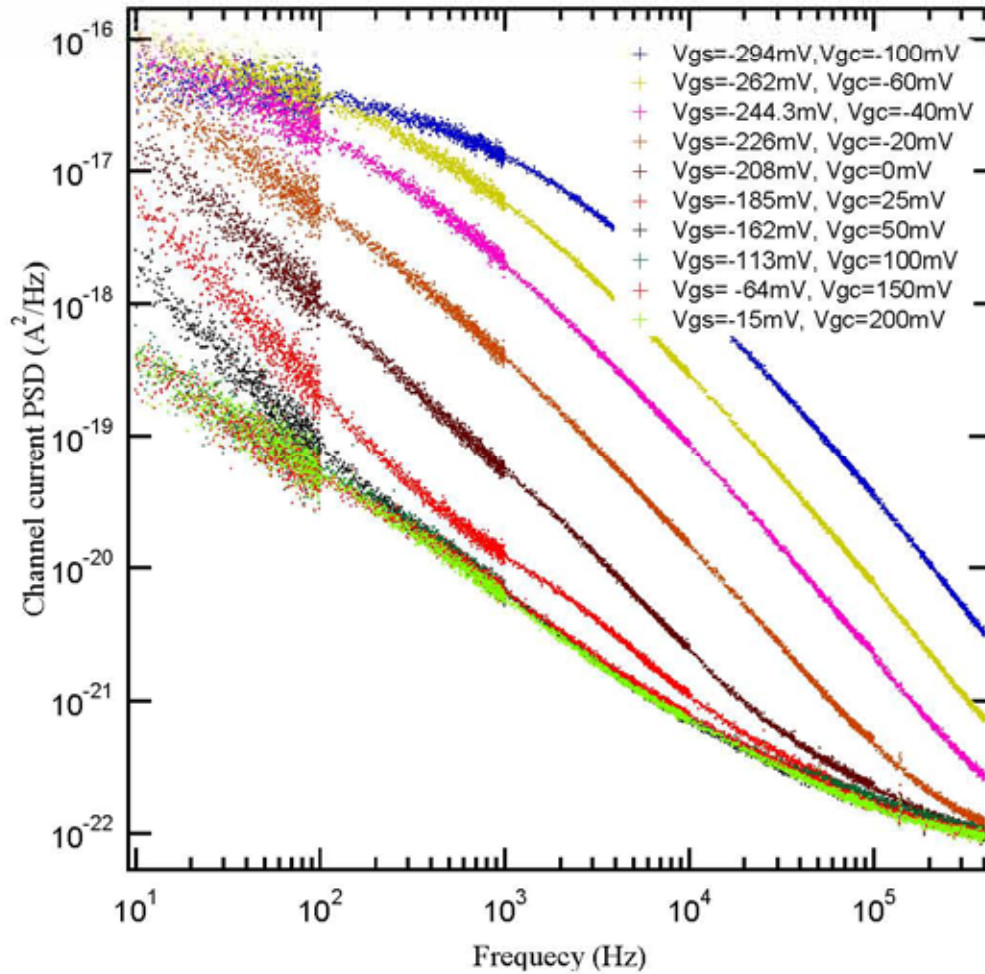
Par la méthode de bias-cooling,
 I_{gs} a été modulé de
 10^{-7} A à 10^{-17} A



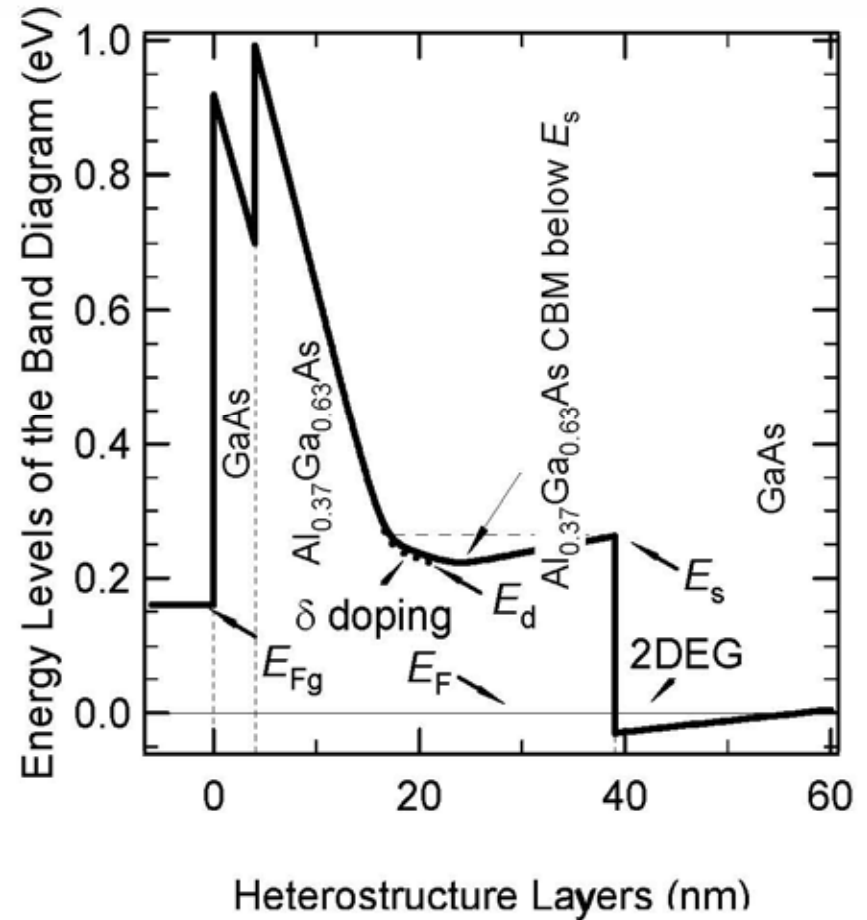
Appl. Phys. Lett. 99, 113505 (2011)

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

surplus de bruit et courant de fuite de grille



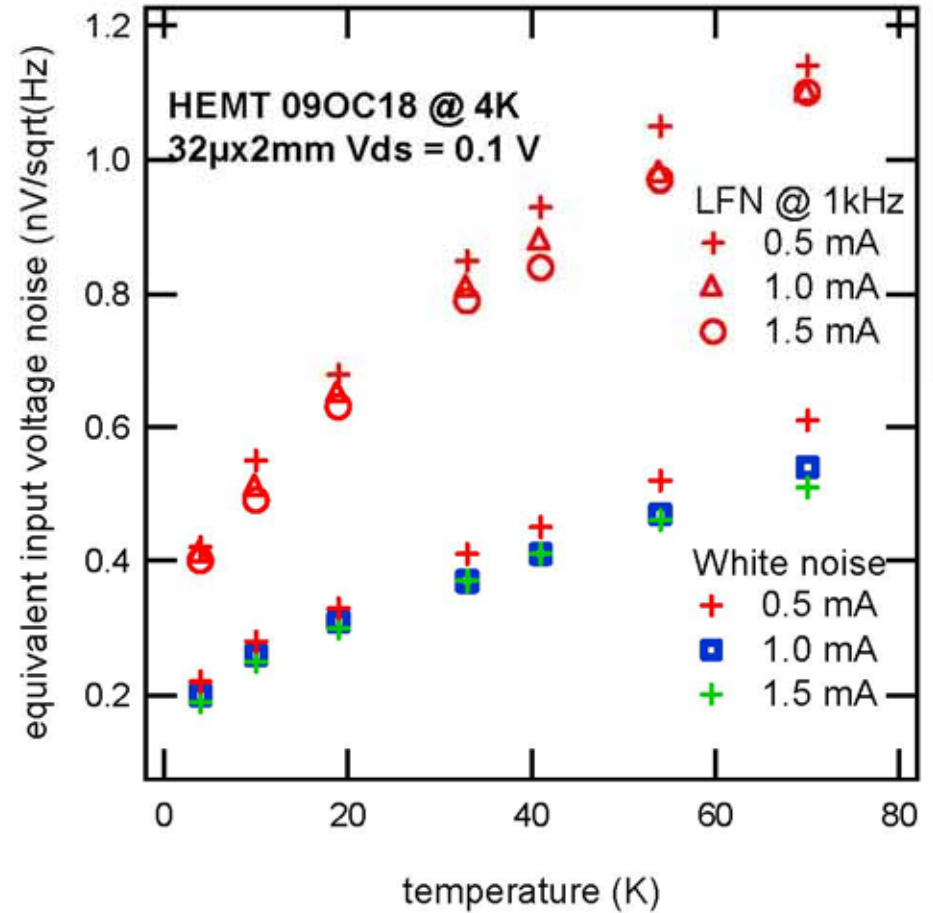
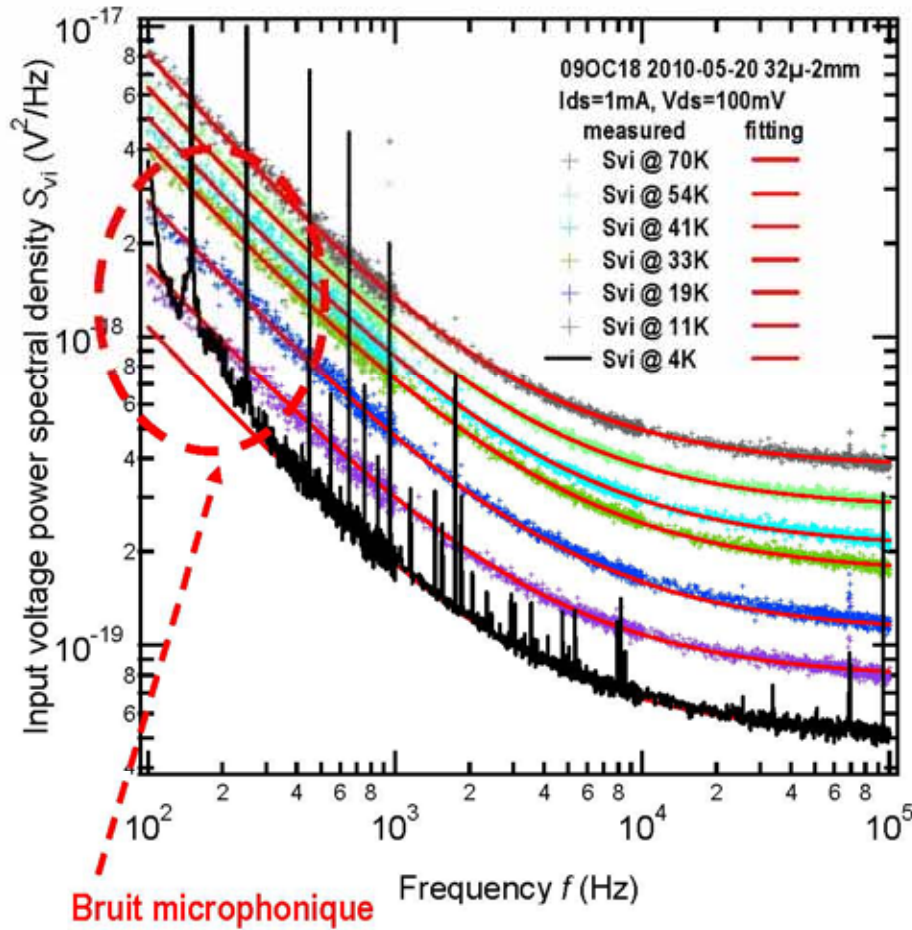
S_{i_o} dépend fortement I_{gs} séquentiel



Appl. Phys. Lett. 99, 113505 (2011)

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

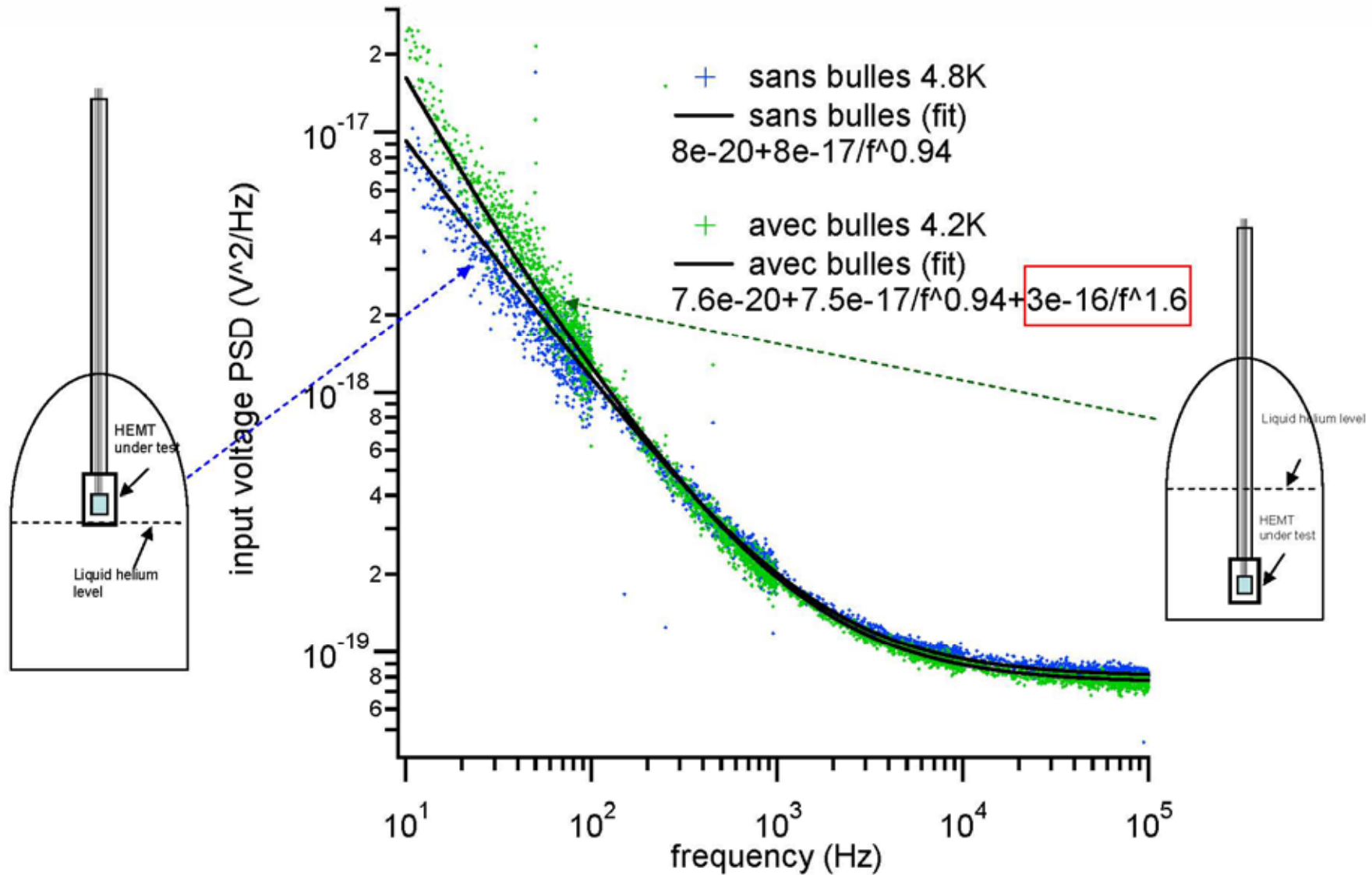
Investigations en cours: e_n en fonction de la température



$$T \searrow \rightarrow e_n \searrow$$

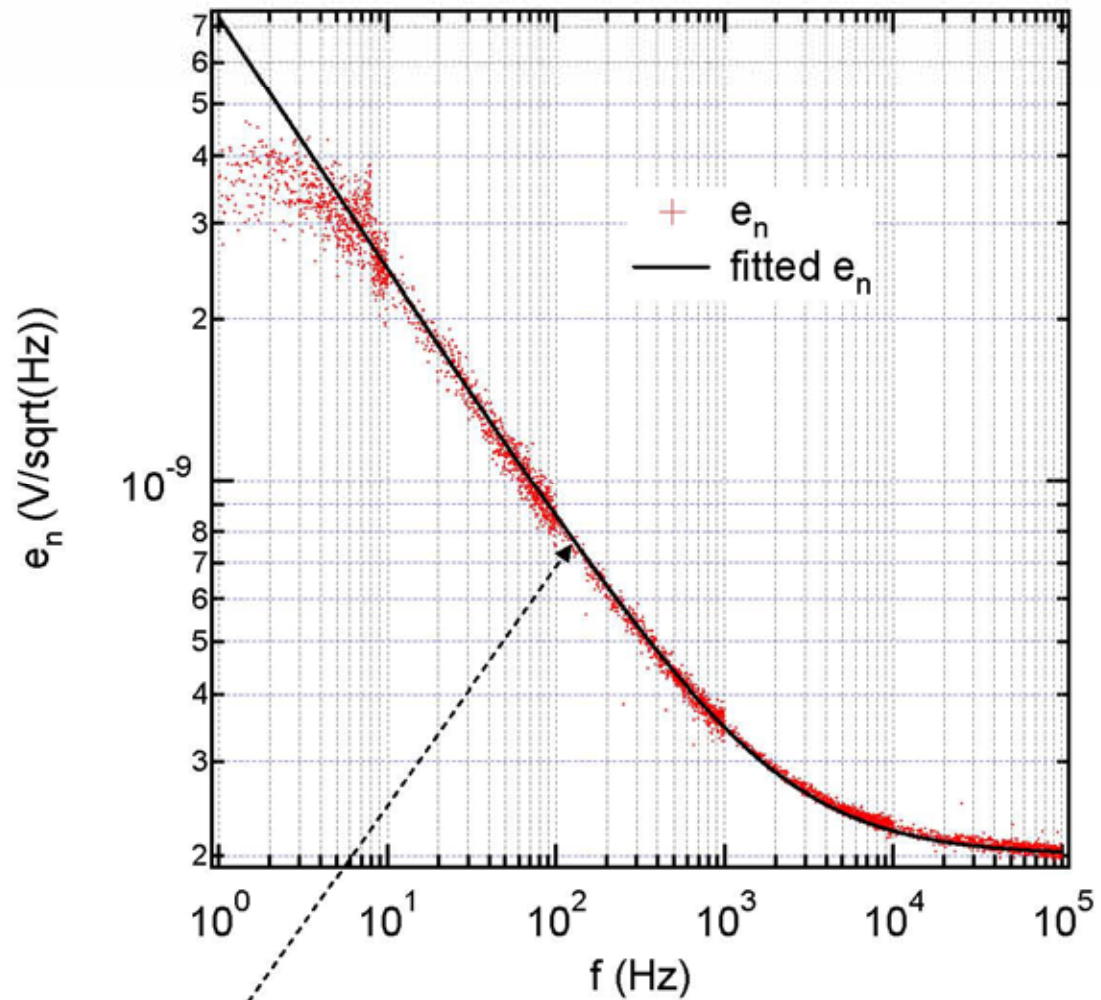
HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Investigations en cours: observation du bruit microphonique



HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Investigations en cours: e_n vers très basse fréquence



À 4.8 K

$V_{ds}=100\text{mV}$,

$I_{ds}=1\text{mA}$,

$C_{gs}=100\text{pF}$,

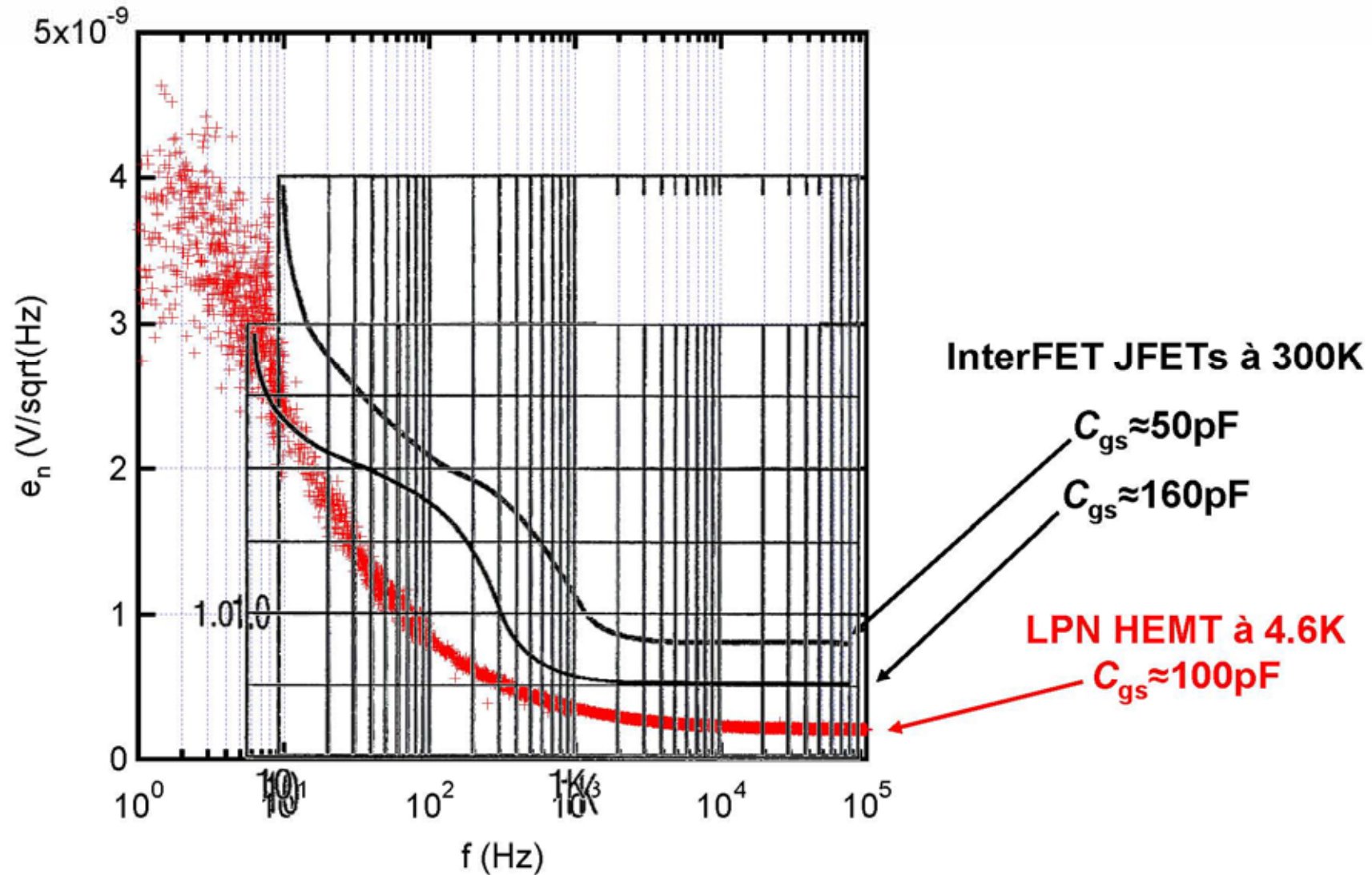
$g_m=36.9\text{mS}$,

$g_d=0.7\text{mS}$

$$e_n = \sqrt{S_{io} / g_m^2} = \sqrt{4.0 \times 10^{-20} + 5.3 \times 10^{-17} / f^{0.94}}$$

HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Investigations en cours: résumé et discussion



HEMTs spécifiques pour la cryoélectronique

Investigations en cours: résumé et discussion

Les résultats préliminaires montrent que le bruit dans les HEMTs à condition cryogénique peut être plus facilement décrit par la PSD en courant du canal S_{io} qui est la somme de

- bruit blanc: $S_{io_w} = F 2eI_{ds}$, $F \sim$ de 0.7 à 0.1 selon la configuration et la polarisation;
- bruit 1/f: $S_{io_f} = \beta I_{ds} / f^\gamma$, $\gamma \approx 1$ et β selon la configuration et la polarisation.

Le bruit équivalent à l'entrée en tension:

$$e_n^2 = \frac{S_{Vo}}{A_v^2} = \frac{S_{io} R_e^2}{g_m^2 R_e^2} = \frac{S_{io}}{g_m^2} \quad S_{io} = S_{io_w} + S_{io_f}$$

L'intérêt de configurer un circuit avec un gain en tension :

- $A_v \gg 1$, $e_n^2 = S_{io} / g_m^2$ réduire l'impédance équivalente $\frac{1}{g_m} \rightarrow \searrow e_n$ (50 mS \rightarrow 20 Ω)
- $A_v \approx 1$, $e_n^2 = S_{io} R_e^2 = S_{Vo}$

Conclusions et perspectives

- Technologies de fabrication → maturité
- Supériorité des HEMTs à ≤ 4 K // JFETs à > 100 K → démontrée
- Hétérostructure et la configuration de grille → limite intrinsèque
- Répondre aux besoins spécifiques → sur mesure

$$e_{n_f} \sim \frac{1}{\sqrt{f^\gamma C_{gs}}} \quad e_{n_W} \rightarrow \leq 0.1 nV / \sqrt{Hz}$$

Actuellement

Non permanents:

Q. Tong (PhD 2009-2012), **Y. Liang** (postdoc, 2007-2012), **P. Ferry** (stage de M1, 4 mois)

Permanents:

Y. J. (Fab. et org.), **U. Gennser** (MBE), **A. Cavanna** (MBE), **L. Couraud** (Métallisation), **E. Cambril** (EBL).

Antérieurement

Non permanents:

M. Cheng (Clarkson Univ. NY 2007), **E. Grémion** (PhD, soutenue 2008)

Cette étude a été financée en partie par :

- **BDI CNRS-CEA** pour E.G dans le cadre du programme EDELWEISS, soutenue 2008
- **ULYSSE I&II** contrat Triangle de la Physique pour Y.L, 2008-2010
- **Barrette des HEMTs pour BOLOX** contrat CEA, 2009
- **BDI CNRS-CEA** pour Q.T dans le cadre du projet BOLOX, (2009-2012)
- **CESAR** projet Européen pour la cryoélectronique spatiale (2011-2013)

Collaborations et discussions :

A.Benoit(IN/CNRS), **G.Chardin**(IRFU/CEA-Saclay, CNRS), **H.Bouchiat**(LPS/CNRS),
D.C.Glattli(SPEC/CEA-Saclay), **C.Pigot**, **J-L.Sauvageot** et **L.Rodriguez**(IRFU/CEA-Saclay)