

Il rumore nell'elettronica di front-end

Valerio Re

- Dipartimento di Ingegneria Industriale
- Università di Bergamo

- INFN Pavia

Corso nazionale di Formazione: "Elettronica di Front-end per i rivelatori di particelle"

INFN – Pavia, 25 – 29 ottobre 2004

Outline

- Rumore in MOSFET, JFET, transistori bipolari

Rumore nei transistori bipolari

- Rumore granulare nella corrente di collettore
- Rumore granulare nella corrente di base
- Rumore $1/f$ nella corrente di base
- Rumore termico nella resistenza di spreading di base

Transistori bipolari

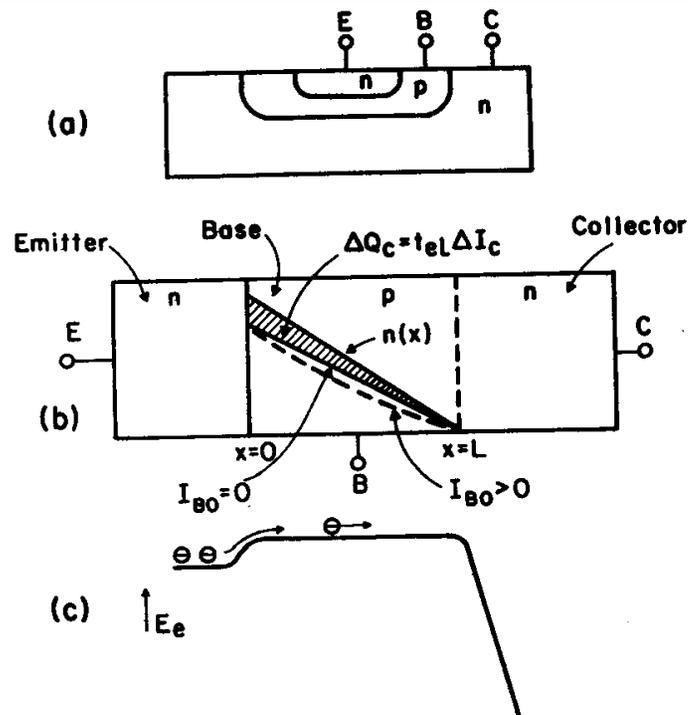


Figure 6 Charge control in a bipolar transistor. (a) Cross section of a typical npn planar bipolar transistor structure. (b) Idealized transistor structure with minority carrier concentration in the base illustrated. Shaded area represents a change in the base charge necessary to change the collector current by ΔI_C ; t_{el} is the electron transit time through the base. (c) Relative potential energy for electrons injected into the base. The emitter-base junction is forward biased and the collector-base junction is reverse biased.

Rumore granulare nella corrente di collettore

In un transistor bipolare i portatori minoritari nella regione attiva diffondono e derivano attraverso la regione di base per essere raccolti alla giunzione base-collettore.

I portatori minoritari che entrano nella regione di transizione base-collettore sono accelerati dal campo elettrico e spazzati via attraverso la regione di collettore.

Il tempo di arrivo alla giunzione base-collettore di tali portatori è puramente casuale, pertanto la corrente di collettore consiste di una serie di impulsi casuali.

La corrente di collettore I_C esibisce rumore granulare pieno, che è rappresentato da un generatore di corrente di rumore la cui densità spettrale di potenza è data da:

$$\overline{\frac{di_C^2}{df}} = 2qI_C$$

Rumore granulare nella corrente di collettore

Il rumore granulare nella corrente di collettore può essere espresso in funzione della transconduttanza g_m . L'espressione dello spettro di potenza assume una forma simile a quella del rumore nella corrente di drain di un FET.

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad V_T = \frac{kT}{q}$$

$$\overline{\frac{di_C^2}{df}} = 2qV_T g_m = 4kT \frac{1}{2} g_m$$

Rumore granulare nella corrente di base

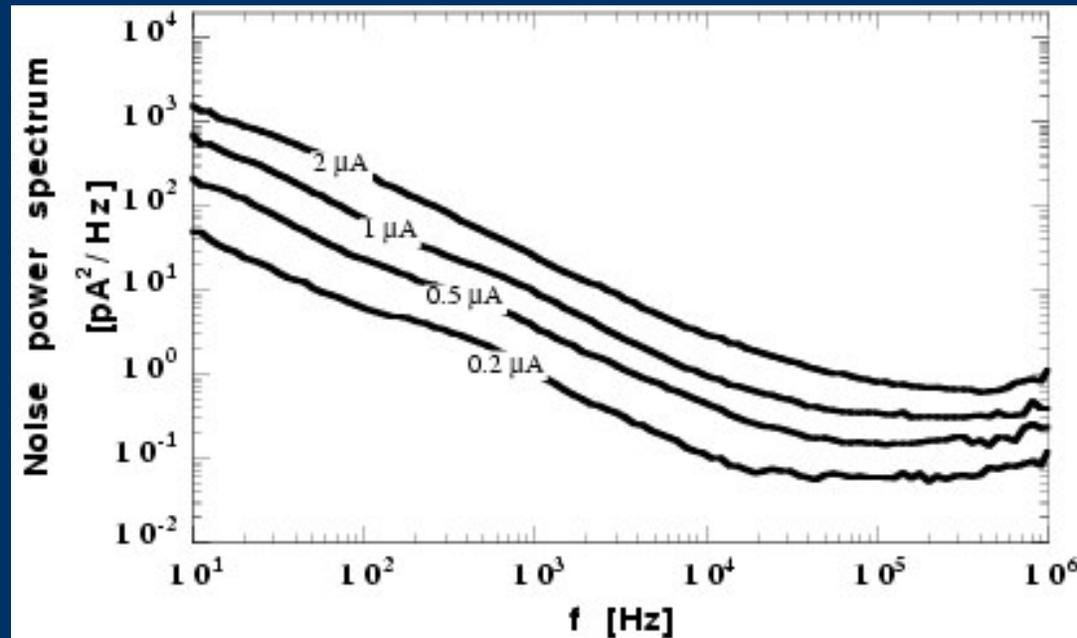
La corrente di base in un transistor è dovuta alla ricombinazione nella base e nella zona di transizione della giunzione base-emettitore e all'iniezione dei portatori dalla base nell'emettitore. Si tratta di processi casuali con fluttuazioni che seguono le leggi del rumore granulare.

Quindi anche I_B esibisce rumore granulare come indicato dal primo termine della seguente espressione:

$$\overline{\frac{di_B^2}{df}} = 2qI_B + k_f \frac{I_B^2}{f}$$

Rumore 1/f nella corrente di base

Il rumore 1/f nei transistori bipolari è causato principalmente da trappole associate a contaminazione e difetti nella zona di svuotamento fra base ed emettitore, in particolare nella zona superficiale.

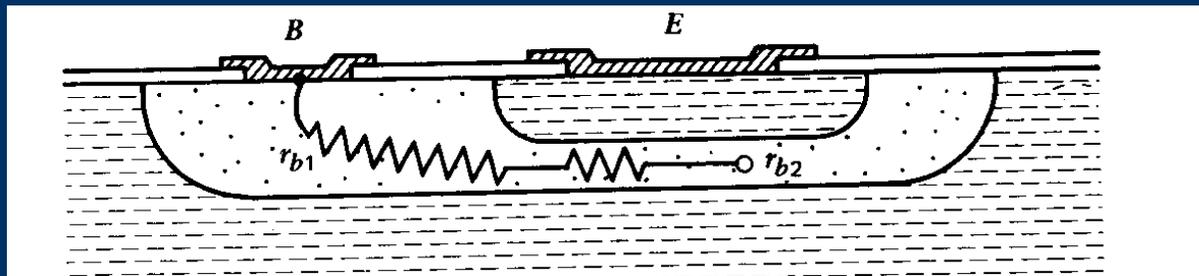


Rumore termico nella resistenza di spreading di base

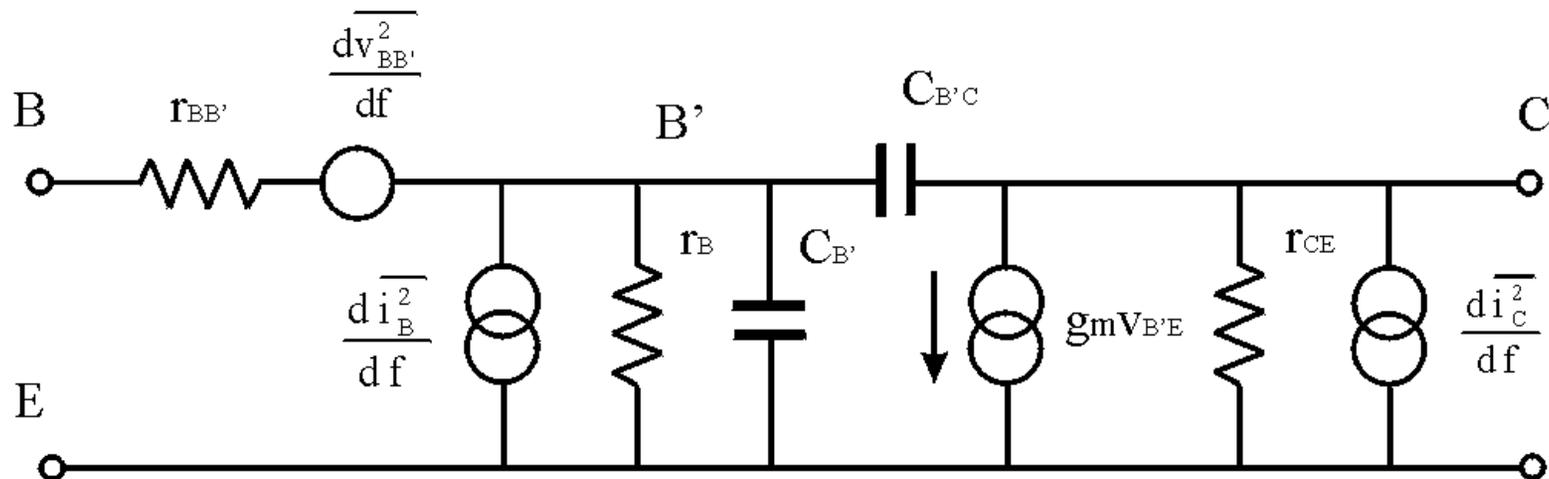
Poiché il contatto di base è distante dalla regione attiva di base, c'è una resistenza fisica $r_{BB'}$ fra contatto e regione attiva, a cui è associata una sorgente di rumore termico.

$$\overline{dv_{BB'}^2} = 4kTr_{BB'}$$

Questa resistenza è costituita da due contributi. Il primo è dovuto alla resistenza fra il contatto di base e il confine della regione di emettitore, il secondo alla resistenza fra il confine dell'emettitore e la regione di base dove scorre effettivamente la corrente. Ad alte correnti l'iniezione dei portatori in base avviene alla periferia dell'emettitore (current crowding) e il secondo contributo è trascurabile.



Circuito equivalente per piccolo segnale del transistor bipolare con i generatori di rumore



r_B e r_{CE} sono resistenze fittizie, usate per modellare il comportamento del dispositivo, e non presentano quindi rumore termico.

Sorgenti di rumore nei FET

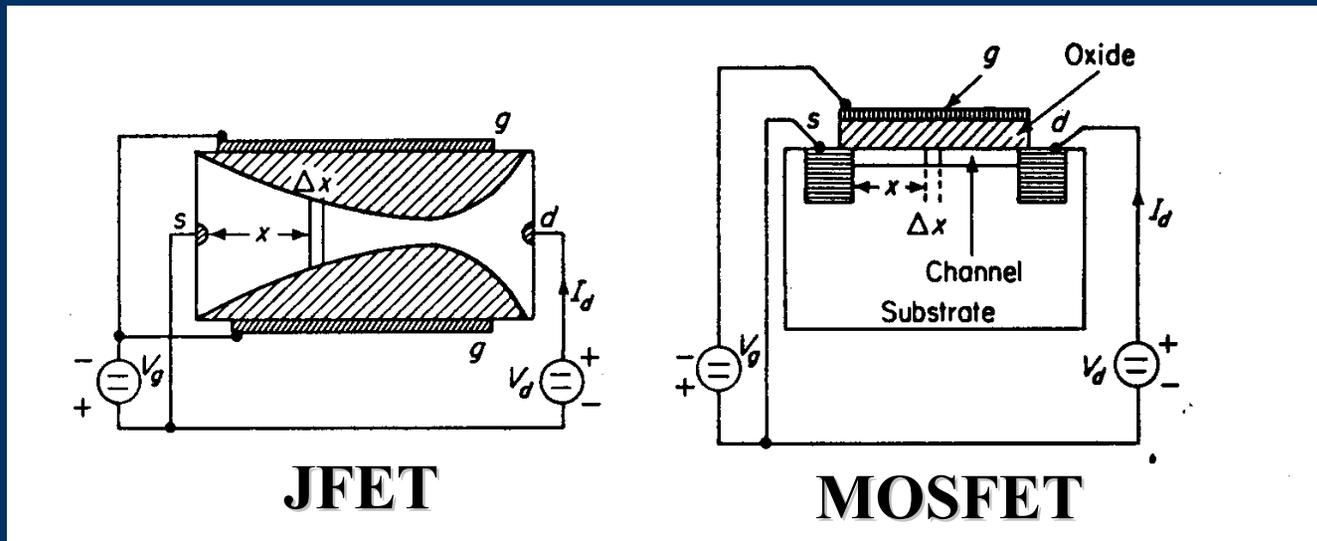
- Rumore termico nella corrente di drain
- Rumore Lorentziano nella corrente di drain
- Rumore $1/f$ nella corrente di drain
- Rumore termico nelle resistenze di gate e substrato
- Rumore granulare nella corrente di gate

Rumore termico nella corrente di drain

Un FET opera modulando la resistenza del canale. Il canale che congiunge source e drain è modulato dalla tensione gate-source, che controlla quindi la corrente di drain.

Il canale quindi è una conduttanza variabile, che presenta rumore termico dovuto all'agitazione dei portatori di carica nel canale.

Questa sorgente di rumore si rappresenta con un generatore di corrente di rumore fra source e drain.



Rumore termico nella corrente di drain

A $V_{DS} = 0$, il canale può essere trattato come un resistore omogeneo, di conduttanza g_{d0} ($g_d = \partial I_D / \partial V_{DS}$). Il rumore termico nella corrente di canale è quindi:

$$S_{I_D}(f) = 4kTg_{d0}$$

A $V_{DS} > 0$, il canale non è più un resistore omogeneo, quindi il rumore termico viene calcolato per integrazione lungo il canale.

Si ottiene:

$$S_{I_D}(f) = 4kT\Gamma g_{d0}$$

In saturazione ($V_{DS} > V_{GS} - V_T$), e per dispositivi a canale lungo, $\Gamma = 2/3$ e $g_m = g_{d0}$ ($g_m = \text{transconduttanza}$).

Rumore termico in FET a canale corto

In dispositivi a canale corto intervengono due effetti principali legati agli elevati campi elettrici longitudinali ($E = V_{DS}/L$).

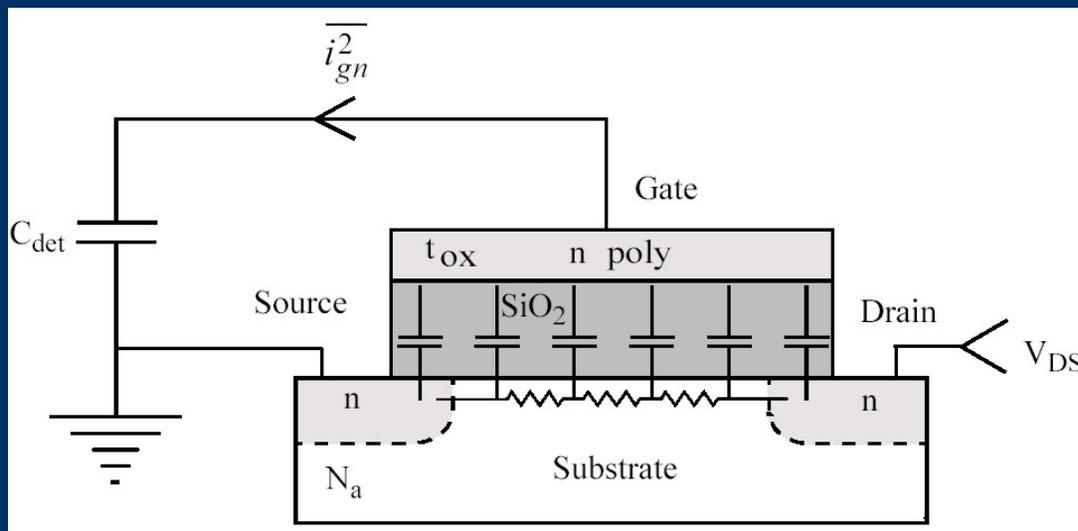
All'aumentare del campo la mobilità diminuisce e la velocità dei portatori satura al valore $v_{sat} = \mu_0 E_C$ (μ_0 = mobilità a bassi campi, E_C = campo critico).

La temperatura dei portatori nel canale aumenta rispetto alla temperatura T del reticolo.

Questi effetti provocano un aumento del coefficiente Γ , che può raggiungere valori fra 1 e 1.5 in tecnologie CMOS “deep submicron”.

Rumore termico di canale accoppiato capacitivamente al gate

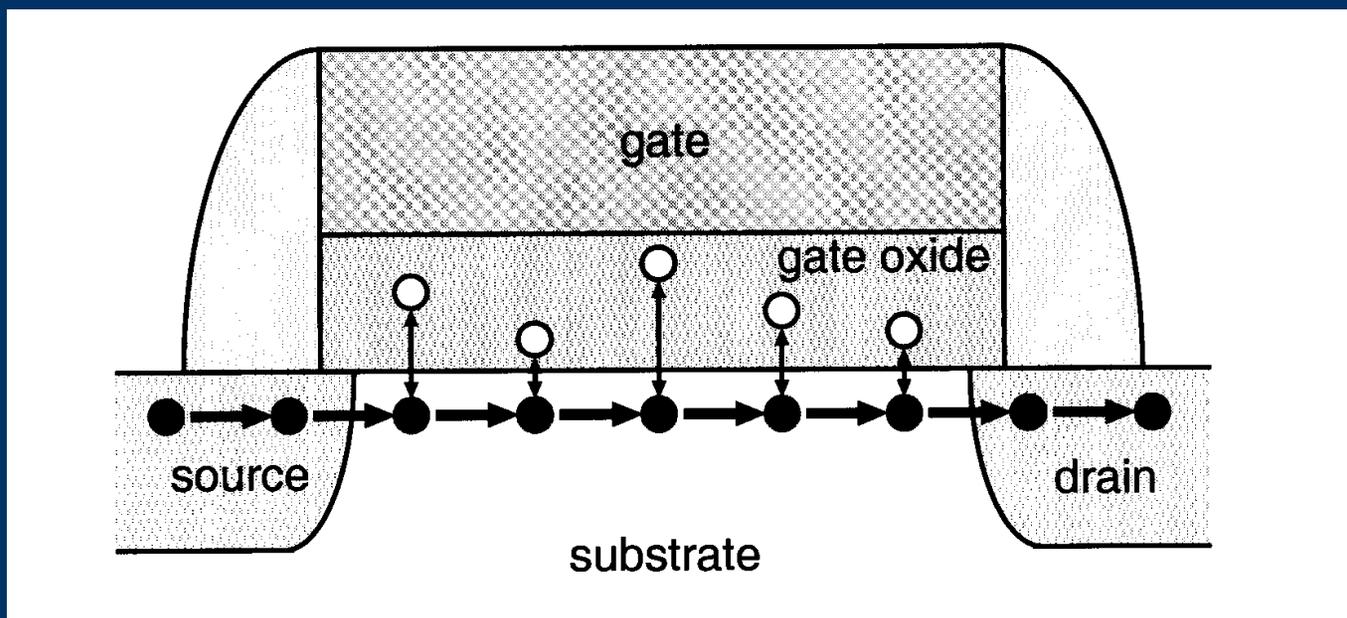
Ad alta frequenza il FET si comporta come una rete RC distribuita, in cui il canale stesso rappresenta la resistenza distribuita. Le fluttuazioni dovute al rumore termico nel canale inducono tramite accoppiamento capacitivo una corrente di rumore al morsetto di gate.



$$S_{I_G}(f) \cong 4kT \frac{1}{4} \frac{\omega^2 C_{GS}^2}{g_m} =$$
$$= 4kT \frac{g_m}{5} \left(\frac{f}{f_T} \right)^2$$

In misure di carica da sorgenti capacitive questo contributo risulta trascurabile.

Rumore $1/f$ nella corrente di drain



Rumore 1/f nella corrente di drain

Il rumore 1/f nel MOS viene generato per l'interazione fra portatori di carica nel canale e trappole nell'ossido di gate. Cattura ed emissione di portatori portano a fluttuazioni nel numero dei portatori e nella mobilità, e quindi a fluttuazioni nella corrente di drain.

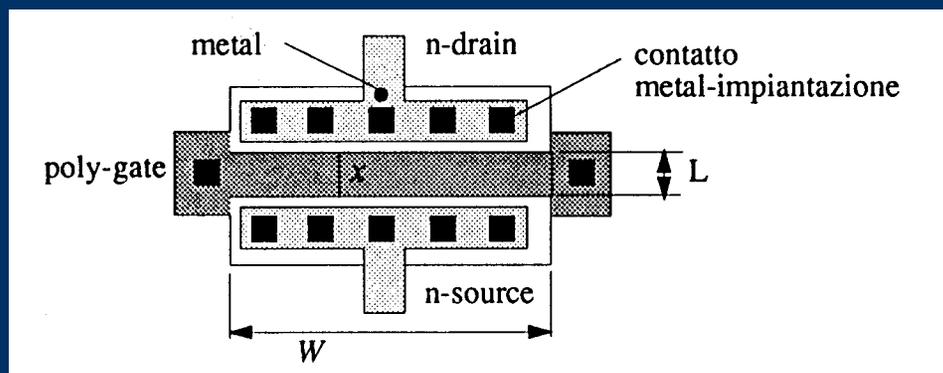
$$\overline{\frac{di_{1/f}^2}{df}} = \frac{\Delta i^2 AN_t}{4\gamma} \cdot \frac{1}{f}$$

L'area A è data da $W \cdot L$ (W = larghezza di gate, L = lunghezza di gate). Una singola carica intrappolata nell'ossido sposta la tensione di soglia di $q/(WLC_{OX})$ (C_{OX} = capacità dell'ossido per unità di area). Poiché $\Delta i = g_m \Delta V_{GS}$:

$$\overline{\frac{di_{1/f}^2}{df}} = \frac{g_m^2 q^2 WLN_t}{(WLC_{OX})^2 4\gamma} \cdot \frac{1}{f} = \frac{K_a g_m^2}{WLC_{OX}^2} \cdot \frac{1}{f}$$

Rumore termico nella resistenza di gate

Il polisilicio che costituisce l'elettrodo di gate è resistivo e quindi presenta rumore termico. Il valore di $R_{GG'}$ dipende fortemente dal layout del dispositivo.



In un MOSFET con un finger di gate contattato da entrambi i lati, il rumore associato alla resistenza distribuita di gate è:

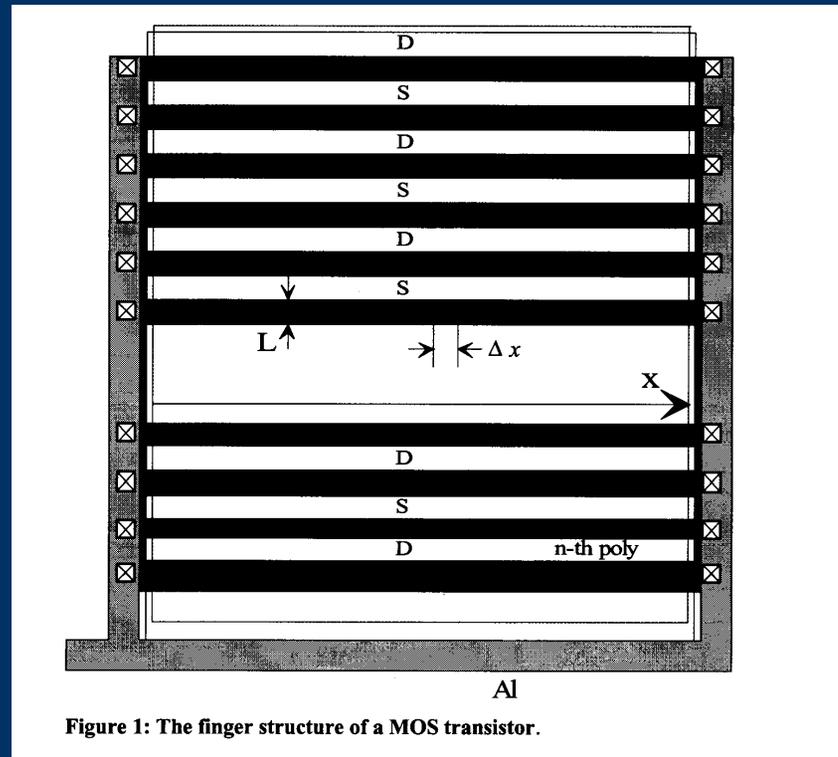
$$\overline{\frac{de_{GG'}^2}{df}} = 4kT \frac{R}{12}$$

$$R = \rho \frac{W}{L}$$

W, L = larghezza e lunghezza del finger

ρ = resistività del polisilicio

Rumore termico nella resistenza di gate

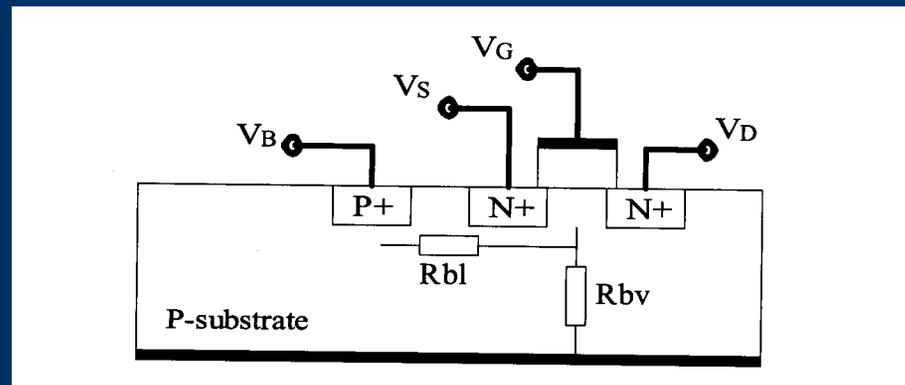


In un MOSFET con n finger di gate contattati da entrambi i lati, il rumore associato alla resistenza distribuita di gate è:

$$\overline{\frac{de_{GG'}^2}{df}} = 4kT \frac{1}{n} \frac{R}{12} \quad R = \rho \frac{W}{L}$$

Rumore termico nella resistenza di substrato

Questo contributo di rumore è associato al cammino resistivo fra i contatti di bulk e la regione attiva del dispositivo. Il calcolo della resistenza distribuita $R_{BB'}$, può richiedere la soluzione di problemi tridimensionali.



Il rumore termico in $R_{BB'}$, provoca fluttuazioni nella corrente di drain descritte dalla densità spettrale:

$$\frac{di_{D, BB'}^2}{df} = 4kTR_{BB'}g_{mb}^2$$

g_{mb} è la transconduttanza di bulk, cioè il parametro che descrive la modulazione della corrente di drain da parte della tensione v_{BS} fra bulk e source.

Rumore Lorentziano nella corrente di drain

Si osserva nei JFET, dove è causato dall'intrappolamento e rilascio dei portatori di carica da parte di trappole localizzate nella regione di svuotamento fra gate e canale.

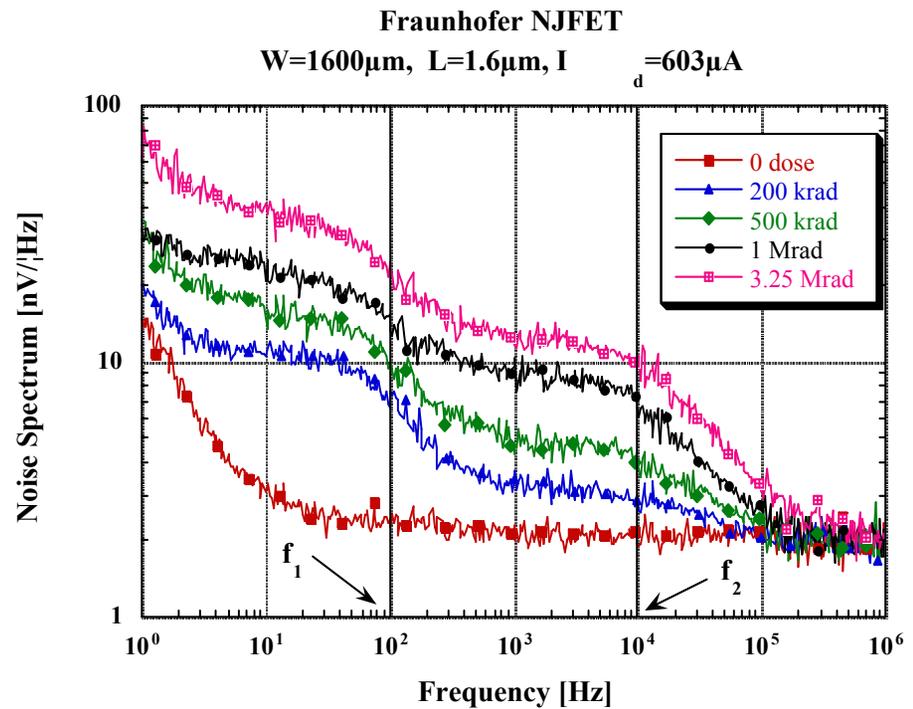
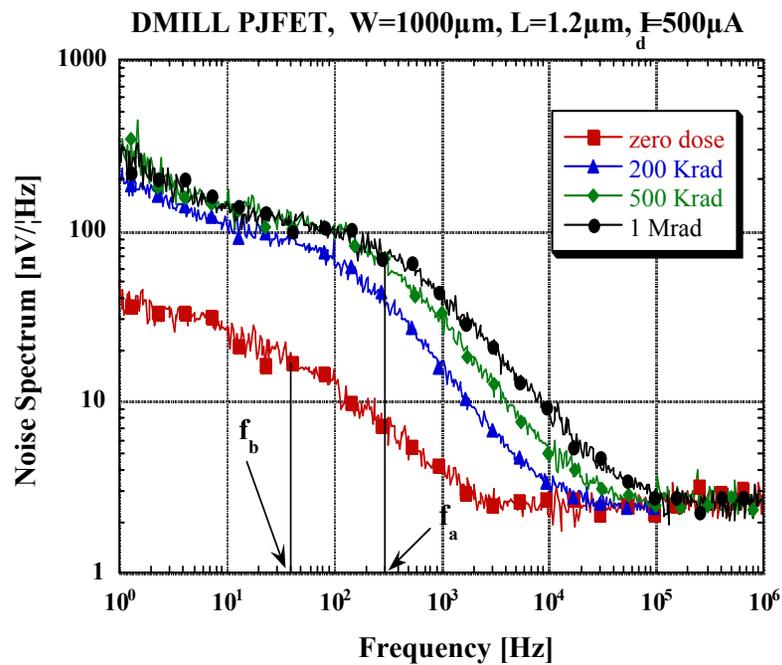
A temperatura ambiente, a frequenze superiori a 1 Hz si osservano nella densità spettrale di rumore nella corrente di drain si osservano uno o due termini di rumore Lorentziano, della forma:

$$\frac{\overline{di_{L,i}^2}}{df} = \frac{A_{L,i} \tau_{L,i} g_m^2}{(1 + \omega^2 \tau_{L,i}^2)}$$

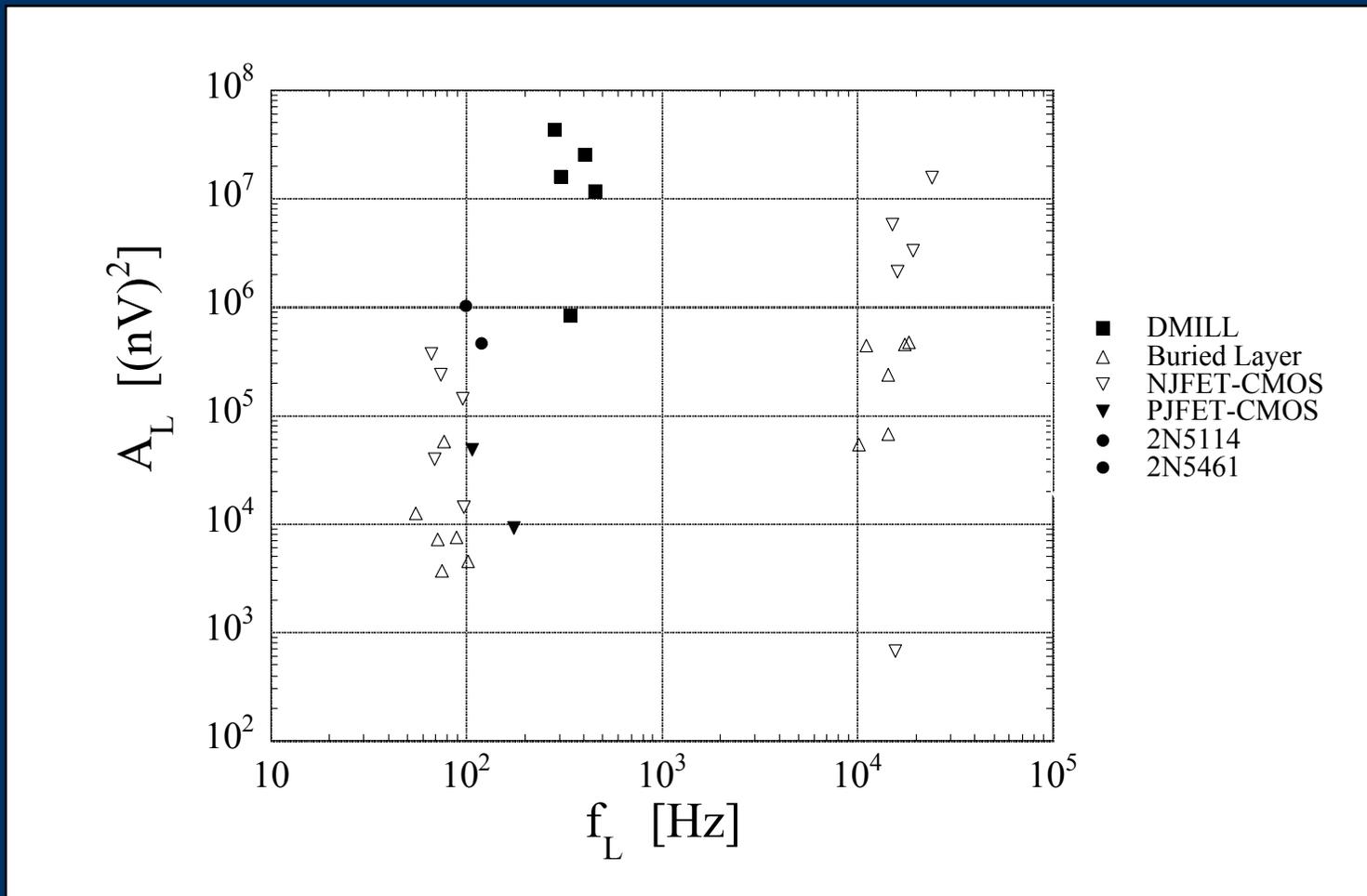
I contributi Lorentziani risultano particolarmente elevati in dispositivi esposti a elevate dosi di radiazione, in cui il dislocamento di atomi nel reticolo dà luogo alla creazione di difetti che agiscono come centri di intrappolamento.

Le frequenze caratteristiche dei termini Lorentziani sono diverse in NJFET e PJFET.

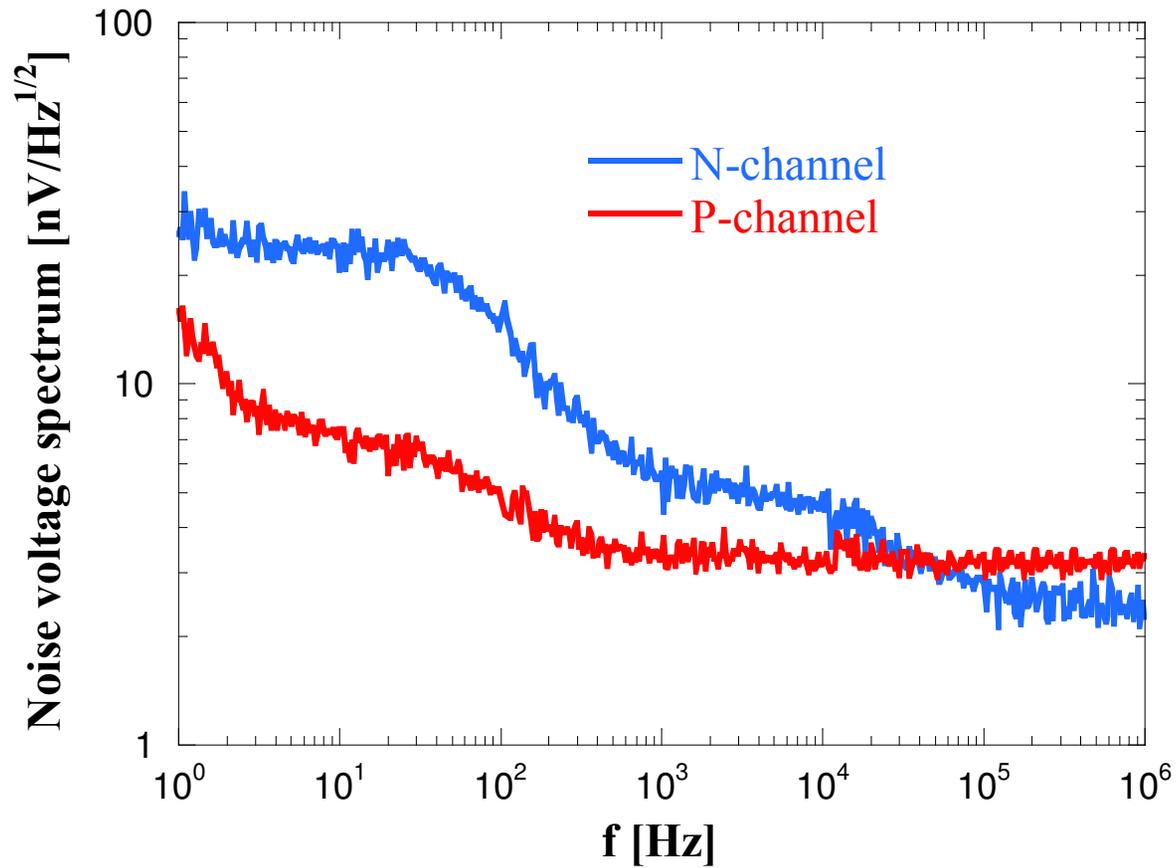
Rumore Lorentziano nella corrente di drain



Rumore Lorentziano nella corrente di drain



NJFET and PJFET exposed to ^{60}Co γ -rays (1 Mrad)

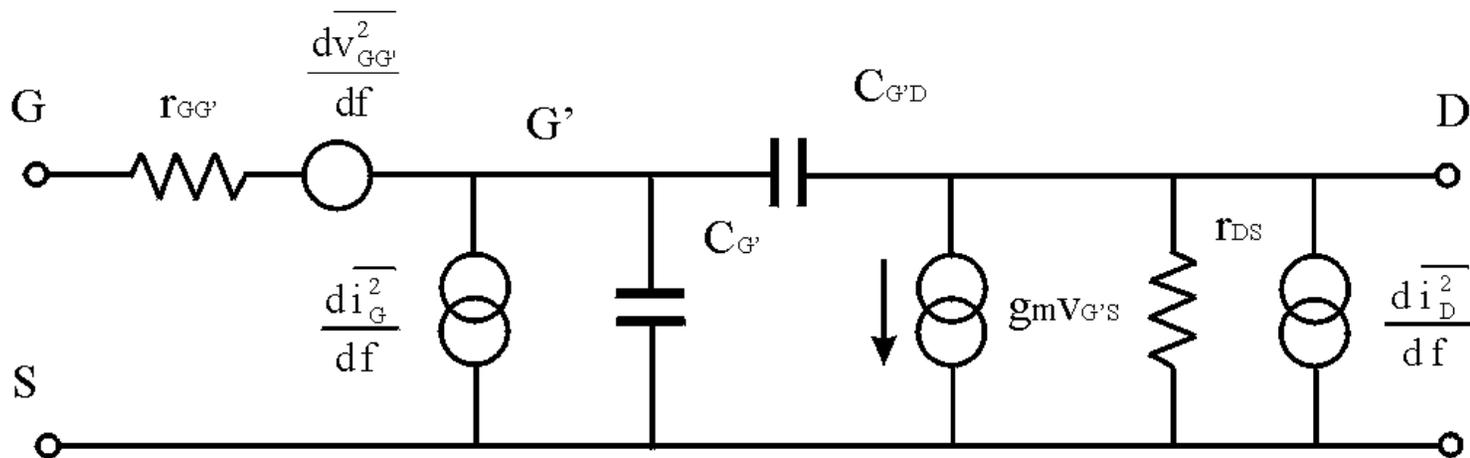


Rumore granulare nella corrente di gate

In un JFET, alla corrente inversa I_G della giunzione gate-canale è associato un termine di rumore granulare, con densità spettrale:

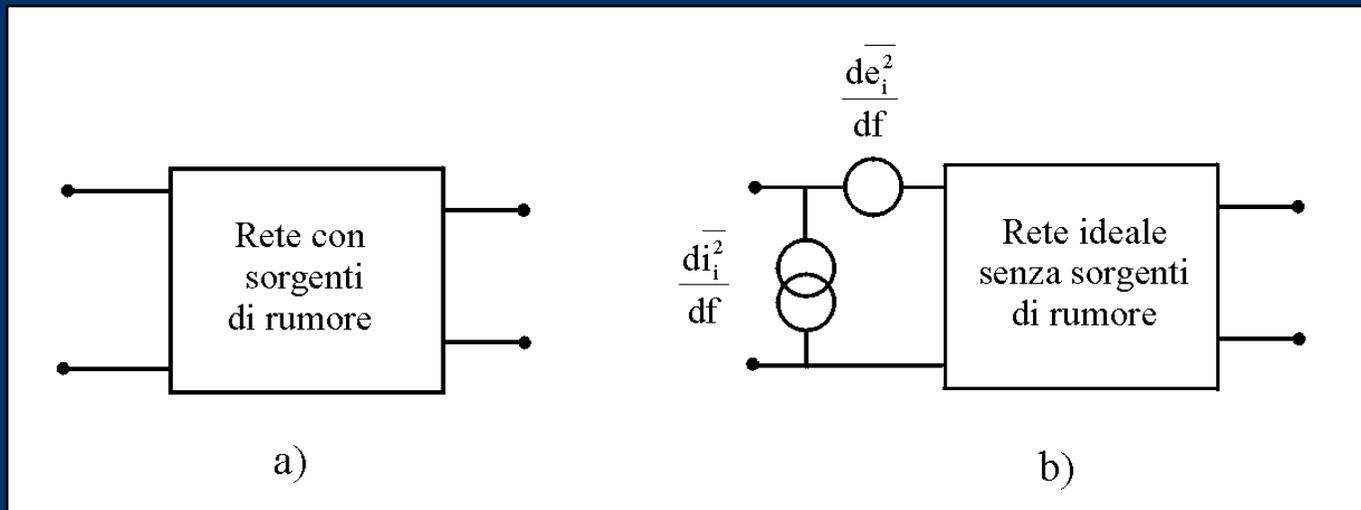
$$\overline{\frac{di_G^2}{df}} = 2qI_G$$

Circuito equivalente per piccolo segnale del FET con i generatori di rumore



Rumore equivalente di ingresso

Allo scopo di confrontare le prestazioni di rumore di diversi dispositivi, è utile una rappresentazione equivalente in cui si considerano i circuiti come privi di rumore e si aggiungono dei generatori di rumore in ingresso che all'uscita hanno lo stesso effetto del rumore intrinseco del circuito (generatori di rumore di tensione serie e di corrente parallelo).

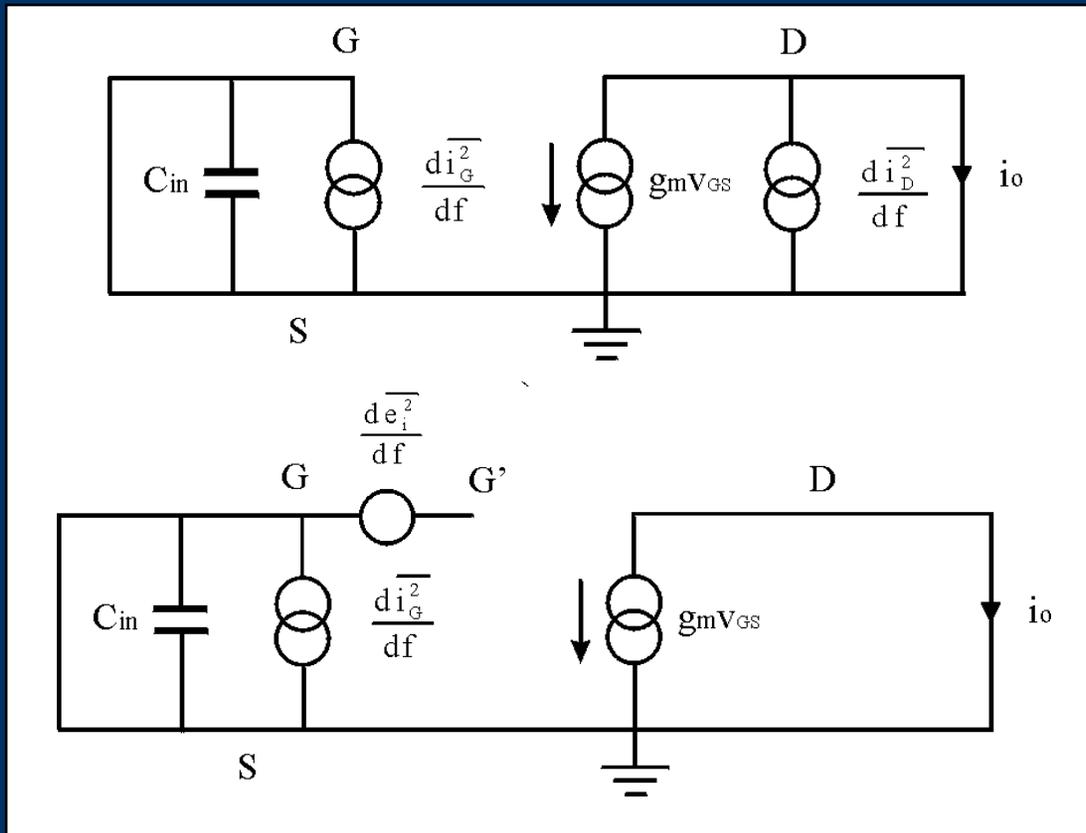


In generale questi due generatori possono non essere indipendenti e si dovrebbe tener conto del termine di correlazione.

Con il generatore serie e il generatore parallelo è possibile rappresentare le caratteristiche di rumore del circuito per qualsiasi tipo di sorgente resistiva di segnale.

Rumore equivalente serie di ingresso: FET

I valori delle densità spettrali dei generatori si possono facilmente determinare prima cortocircuitando l'ingresso di entrambi i circuiti ed eguagliando il rumore in uscita alle due reti per ricavare il valore del generatore di tensione.

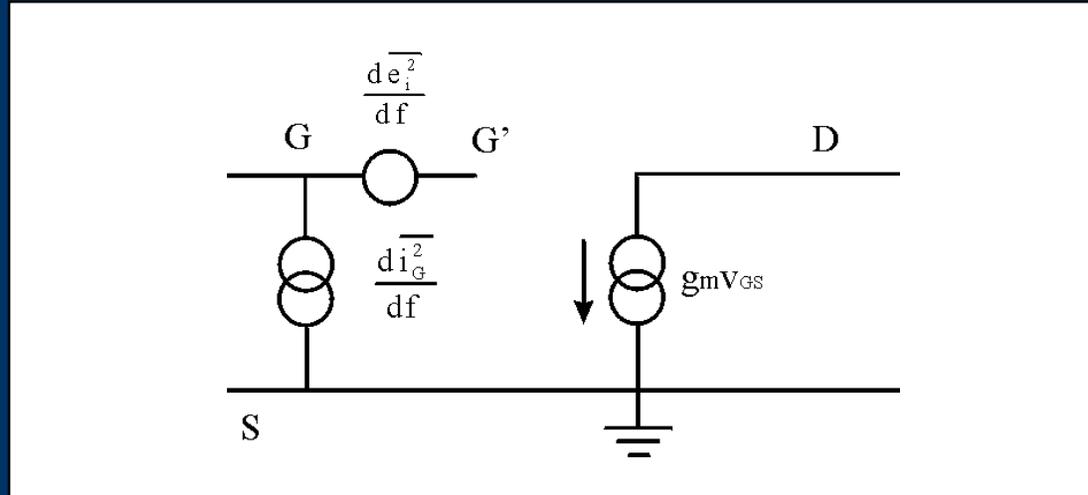


$$\frac{\overline{di_o^2}}{df} = \frac{\overline{di_D^2}}{df}$$

$$i_o = g_m V_{G'S} \quad \frac{\overline{di_o^2}}{df} = g_m^2 \frac{\overline{de_i^2}}{df}$$

$$\frac{\overline{de_i^2}}{df} = \frac{1}{g_m^2} \frac{\overline{di_D^2}}{df}$$

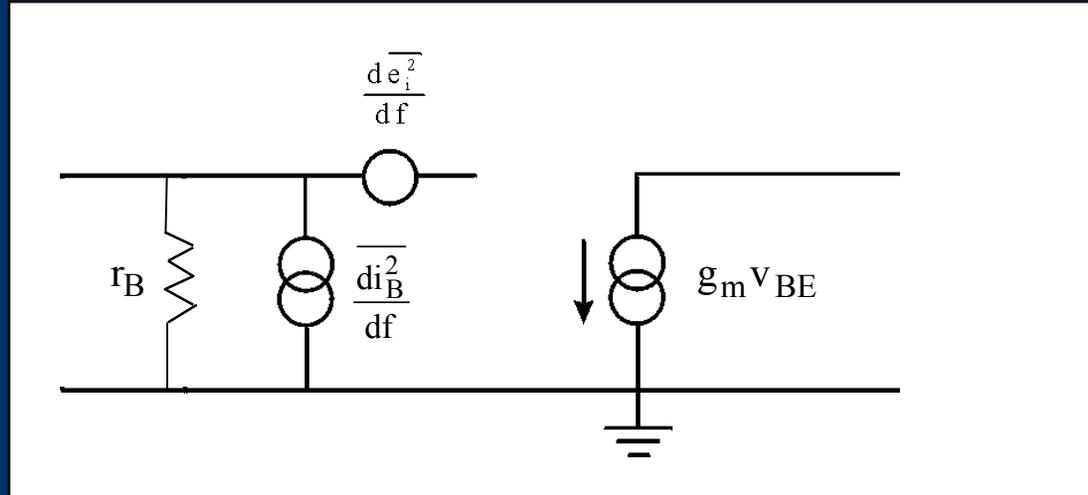
Rumore equivalente serie di ingresso: FET



$$\overline{di_G^2} = 2qI_G$$

$$\overline{de_i^2} = 4kT \frac{\Gamma}{g_m} + 4kTR_{GG'} + 4kTR_{BB'} \frac{g_{mb}^2}{g_m^2} + \frac{K_a}{C_{OX}^2 WL} \frac{1}{f} + \sum_i \left(\frac{A_{L,i} \tau_{L,i}}{1 + \omega^2 \tau_{L,i}^2} \right)$$

Rumore equivalente serie di ingresso: BJT



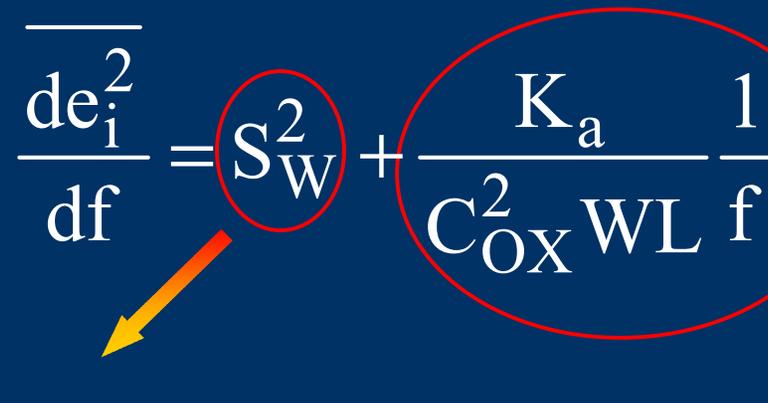
$$\overline{\frac{di_B^2}{df}} = 2qI_B$$

$$\overline{\frac{de_i^2}{df}} = 4kT \frac{1}{2} \frac{1}{g_m} + 4kTr_{BB}$$

Il contributo di r_{BB} , al generatore di rumore serie ha questa espressione nel caso i cui la resistenza del generatore di segnale applicato fra base ed emettitore e r_{BB} , siano molto più piccole di r_B .

Noise in FETs

Gate-referred noise voltage spectrum

$$\overline{\frac{de_i^2}{df}} = S_W^2 + \frac{K_a}{C_{OX}^2 WL} \frac{1}{f}$$


White noise:

1/f noise:

- Channel thermal noise (dominant at low current density)

$$S_W^2 = 4kT \frac{\Gamma}{g_m}$$

- Noise in parasitic resistors

- K_a = intrinsic process parameter

- $C_{OX} = \epsilon_{OX}/t_{OX}$
(t_{OX} = oxide thickness)

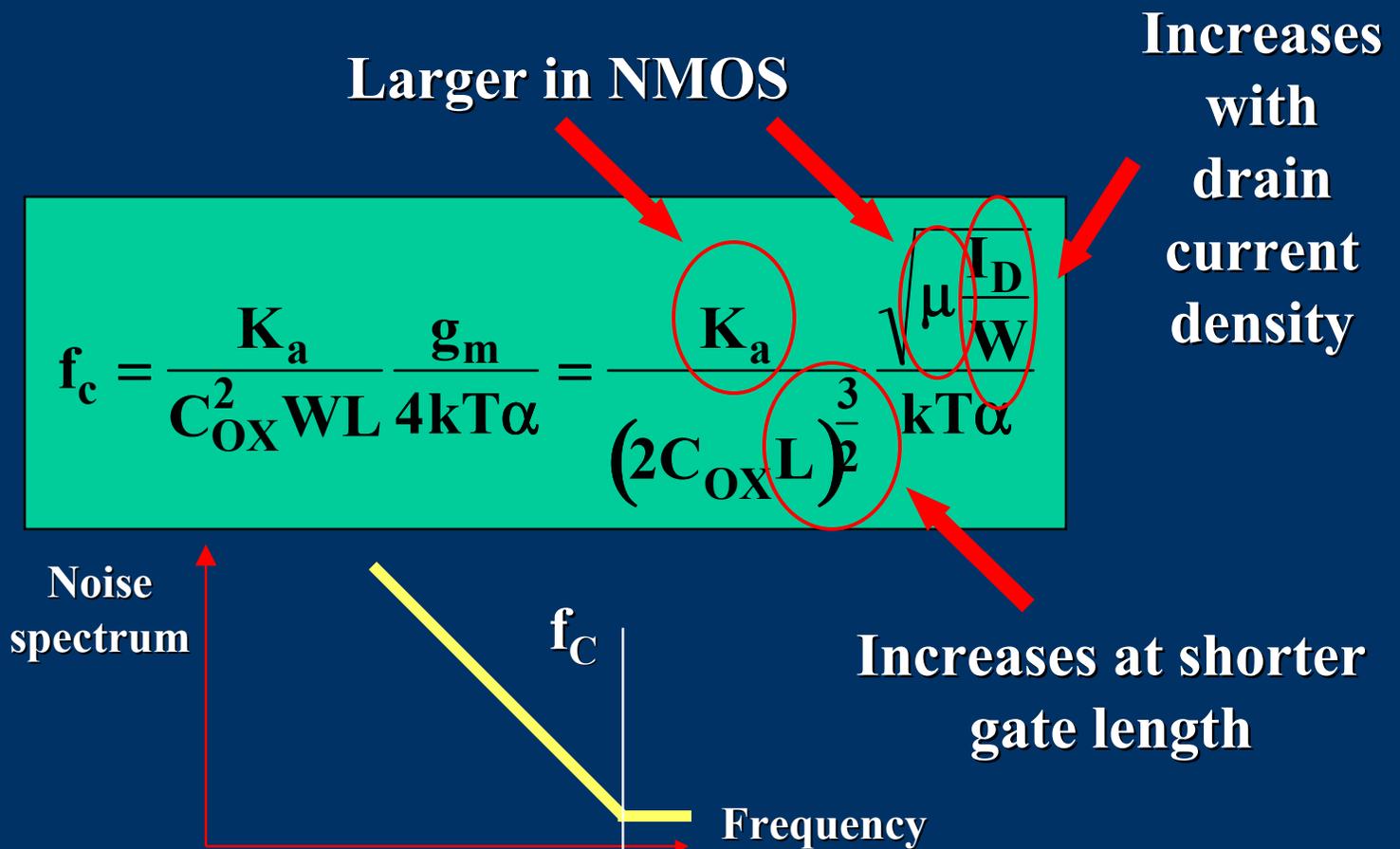
Thermal noise in strong inversion

High current density: thermal noise depends on gate geometry (W , L), polarity (μ), technology (C_{OX})

$$S_W^2 = 4kT \frac{\Gamma}{g_m}$$

$$g_m = \sqrt{2\mu C_{OX} \frac{W}{L} I_D} = \sqrt{3\mu C_{IN} \frac{1}{L^2} I_D}$$

Noise corner frequency: MOSFETs



Thermal noise in weak inversion

Low current density: thermal noise **independent** of gate geometry (W , L), polarity (μ), technology (C_{OX})

$$S_W^2 = \frac{2qI_D}{g_m^2}$$

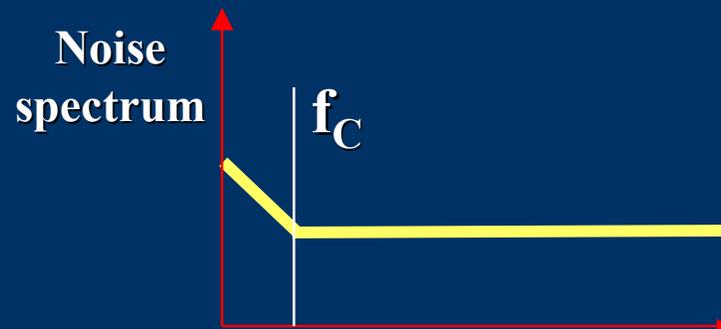
$$g_m = \frac{I_D}{nV_T}$$

Low-noise JFETs

Very small in JFETs

Increases with drain current density

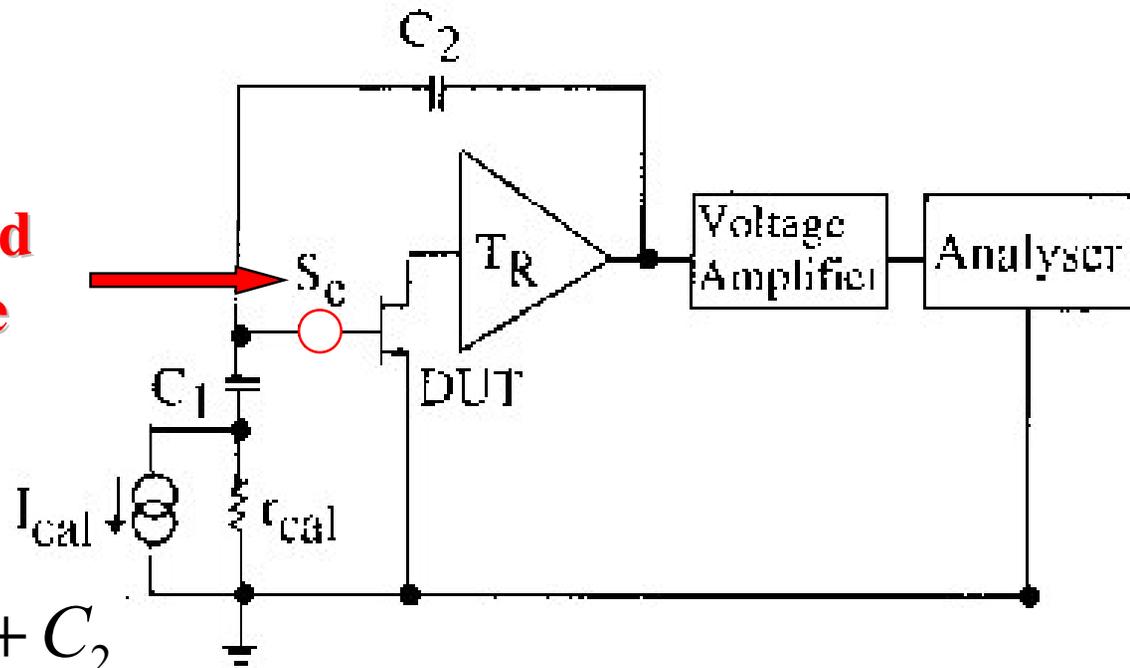
$$f_c = \frac{K_a}{C_{OX}^2 WL} \frac{g_m}{4kT\alpha} = \frac{K_a}{(2C_{OX}L)^{\frac{3}{2}}} \frac{\sqrt{\mu \frac{I_D}{W}}}{kT\alpha}$$



Decreases at larger gate length

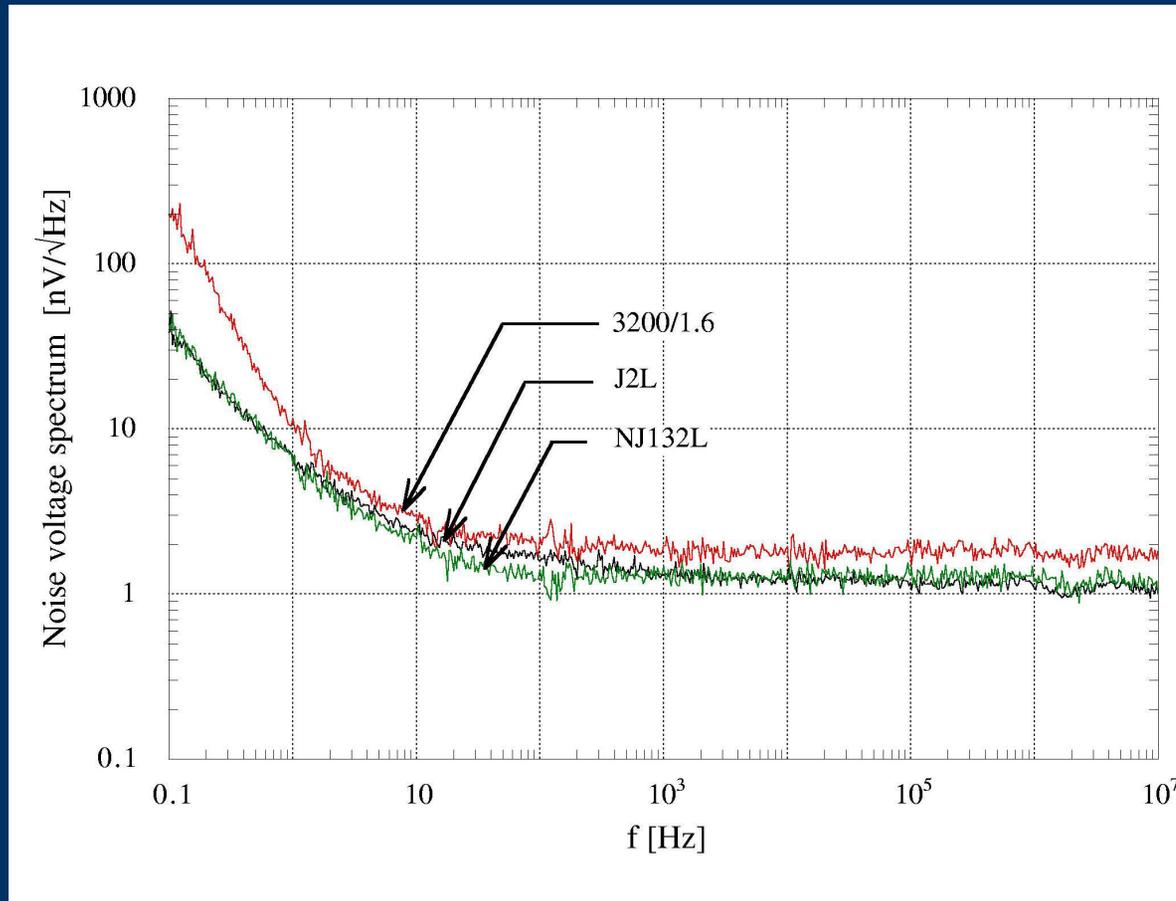
System for noise measurements on JFETs (100 mHz – 1 MHz)

**Gate referred
noise voltage**

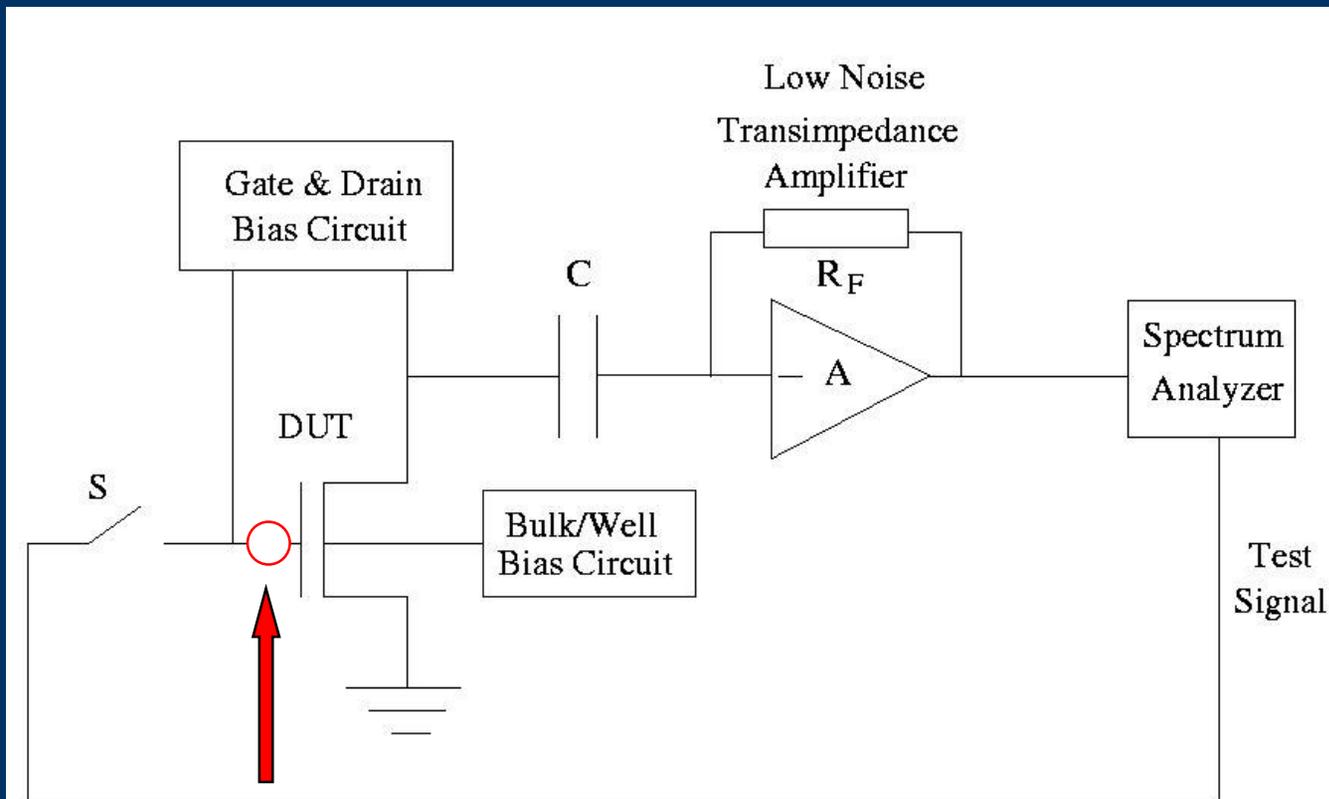


$$Gain = \frac{C_1 + C_2}{C_2}$$

Comparison between discrete, epitaxial (buried layer) and implanted NJFETs



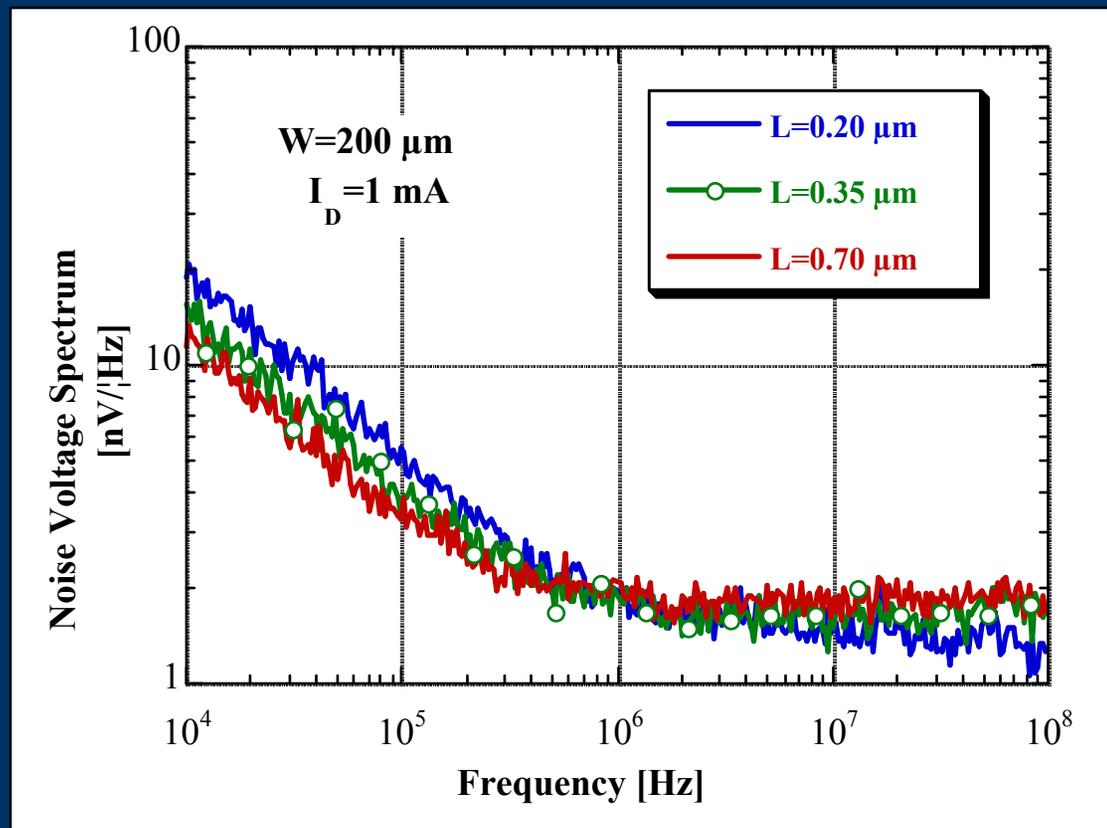
System for noise measurements on CMOS (10 kHz – 300 MHz)



**Gate referred
noise voltage**

$$\text{Gain} = g_{m, \text{DUT}} R_F$$

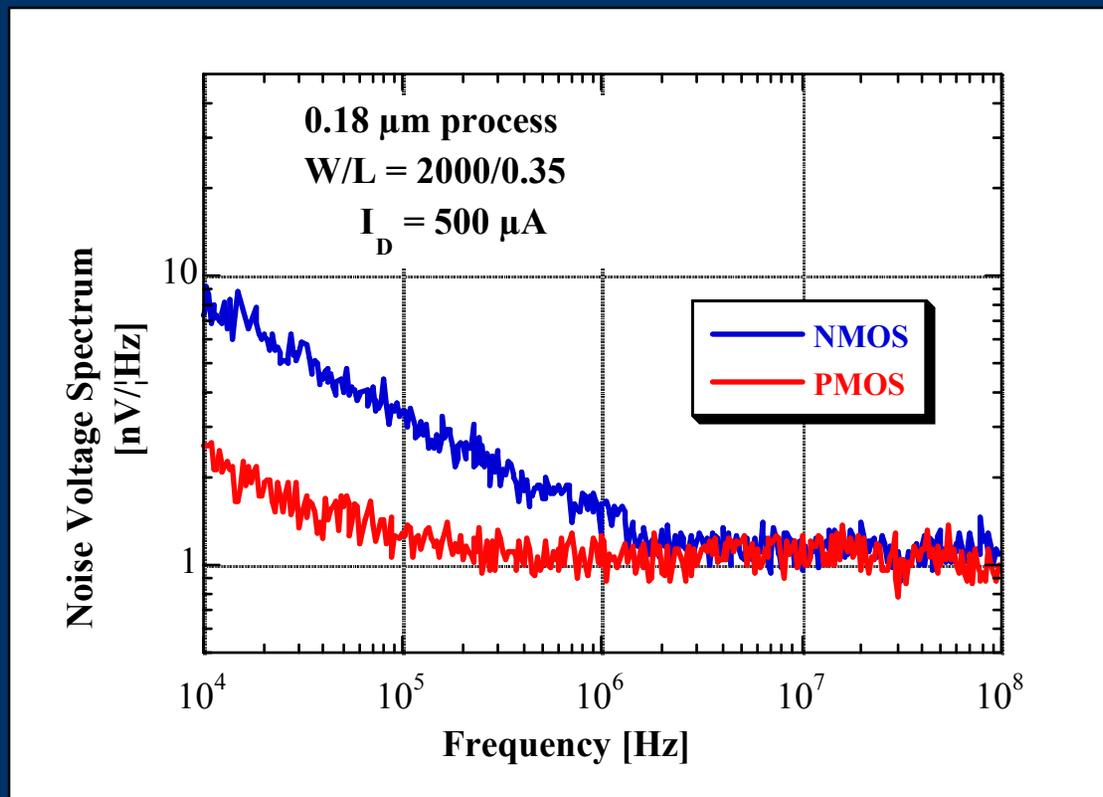
PMOS: effects of gate length reduction



**Strong inversion
(higher current
density)**

0.18 μm technology

Noise in NMOS and PMOS



1/f noise coefficient K_a is larger in NMOS by a factor of 10

0.18 μm technology

Bibliografia

P.F. Manfredi, V. Speziali, F. Svelto, "Extremely low-noise amplifier for interfacing active devices to instruments for spectral analysis", Rev. Sci. Instrum. 65 (12), December 1994.

V. Re, F. Svelto: "Instrumentation for High Accuracy Noise Characterisation of Front-End Devices in Detector Applications". Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 44 (1995) 599.

V. Re, F. Svelto: "High Accuracy Measurement of the Low-Frequency Noise of Front-End P-Channel FETs". Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 44 (1995) 607.

M. Manghisoni, V. Re, V. Speziali, F. Svelto: "Experimental studies of the noise properties of a deep submicron CMOS process", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A 461 (2001), p. 537-539.

V.Re, I. Bietti, R. Castello, M. Manghisoni, V. Speziali, F. Svelto: "Experimental study and modeling of white noise sources in submicron P and N-MOSFETs", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 48, No. 4, August 2001, pp. 1577-1586.

M. Manghisoni, L. Ratti, V. Re, V. Speziali: "Instrumentation for Noise Measurements on CMOS Transistors for Fast Detector Preamplifiers", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, No. 3, June 2002, pp. 1281-1286.

M. Manghisoni, L. Ratti, V. Re, V. Speziali: "Submicron CMOS Technologies for Low-Noise Analog Front-End Circuits", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, No. 4, August 2002, pp. 1783-1790.

M. Manghisoni, L. Ratti, V. Re, V. Speziali: "Radiation hardness perspectives for the design of analog detector readout circuits in the 0.18 μm CMOS generation", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, No. 6, December 2002, pp. 2902-2909.