

Lezione 1

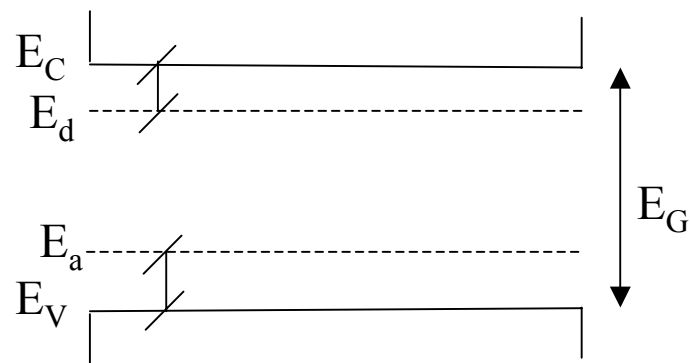
Daniel V. Camin
camin@mi.infn.it

- Microelettronica criogenica: caratteristiche, problematiche e realizzazioni di strutture a basso rumore.
- La spettroscopia di rumore a temperatura variabile quale tecnica per il controllo della contaminazione nei processi produttivi dei FETs.
- Nuove idee sulla trasmissione di segnali analogici via mezzi ottici.

Limitazioni alla operazione dei FETs alle basse temperature

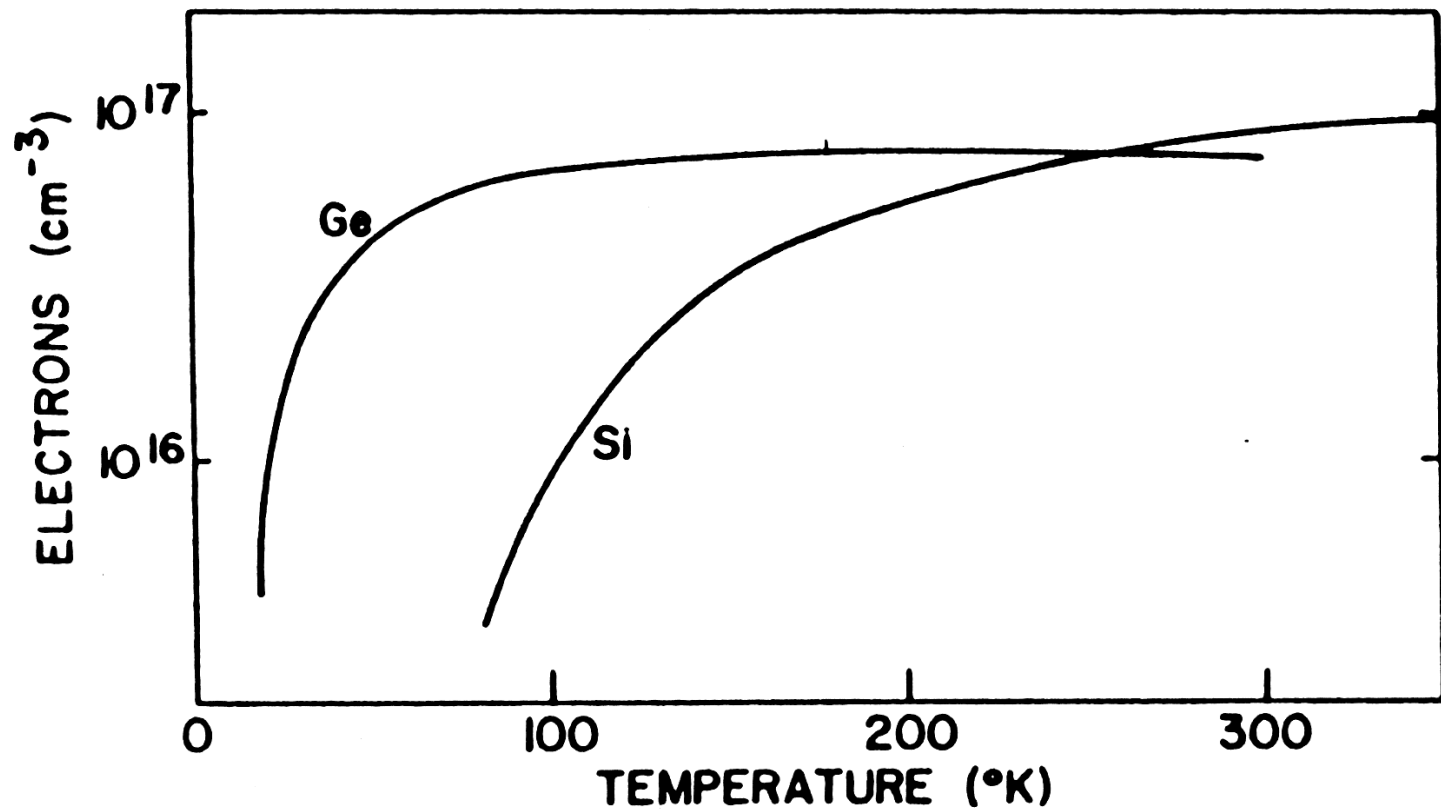
$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu$$

$$n = \sqrt{\left(\frac{N_d \cdot N_c}{2}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right)$$



	Si		Ge	GaAs	
Impurities	As	P		S	Si
Ed(meV)	54	45	10	6	

Congelamento dei portatori

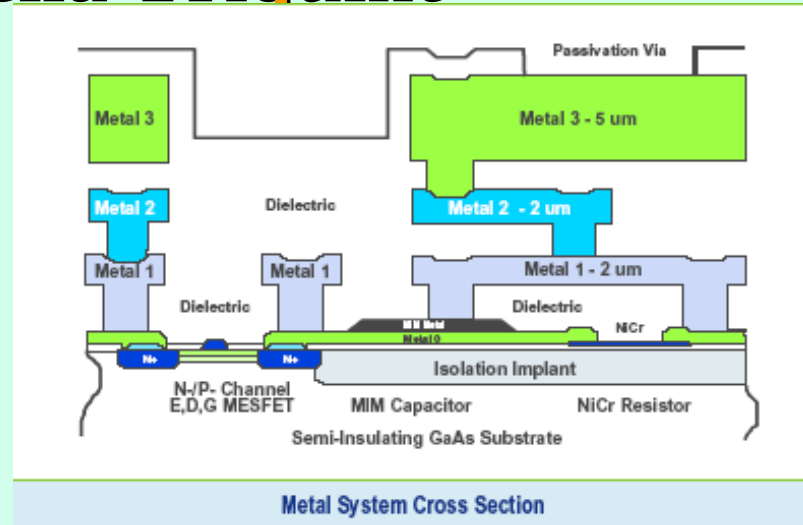
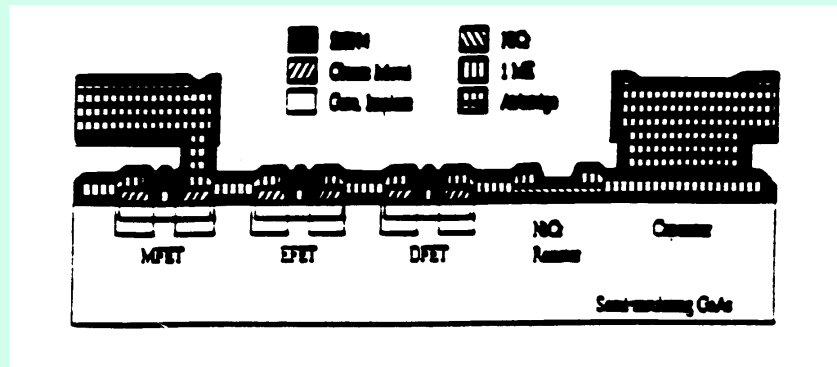


La energia di ionizzazione dei donori pone un limite alla minima temperatura di operazione

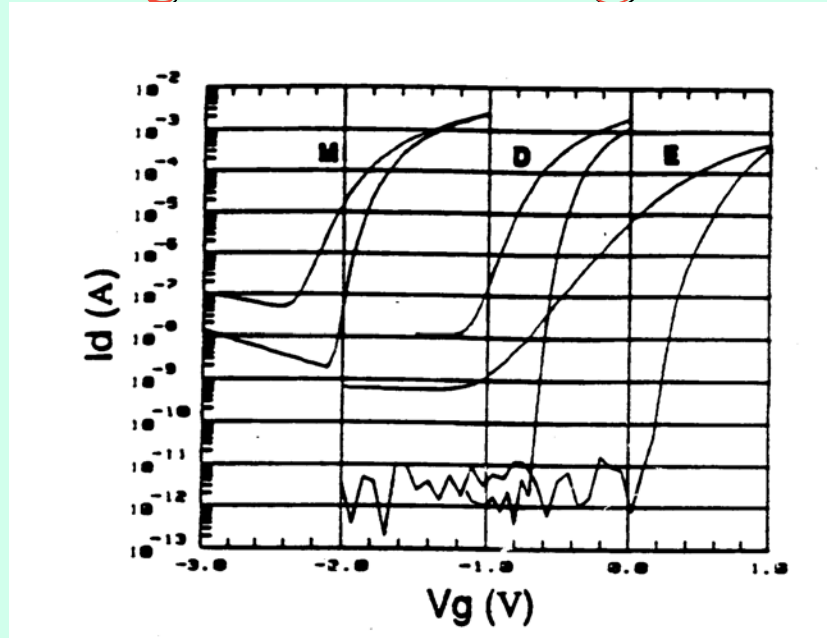
Caratteristiche della tecnologia GaAsMESFET alle basse temperature

- Virtuale assenza di congelamento dei portatori.
- Elevata velocità di saturazione degli elettroni.
- Elevata resistenza alla radiazione.
- Possibilità di realizzare dei FETs ad alta capacità C_{GS}
- Processo industriale QED/A della TriQuint studiato e caratterizzato a temperature criogeniche dal gruppo di Milano.
- Preamplificatori realizzati:
 - circuiti ibridi per operazione a 4 K
 - dispositivi monolitici per il preshower e per il calorimetro a LAr di Atlas.
- In seguito ai risultati di Milano sul processo QED/A a temperature criogeniche, il gruppo di Monaco ha realizzato con successo migliaia di preamplificatori per il calorimetro adronico di Atlas.

Il processo QED/A GaAs MESFET della Triquint



I_d vs V_g Caratteristiche @ 300 K e 77 K



3 tipi di FETs: M, D, E
In ordine decrescente di drogaggio.

La pendenza rappresenta il rapporto
trasconduttanza/corrente

Il SuperFET: sfruttando la tecnologia QED/A a differenti livelli di drogaggio[1-2]

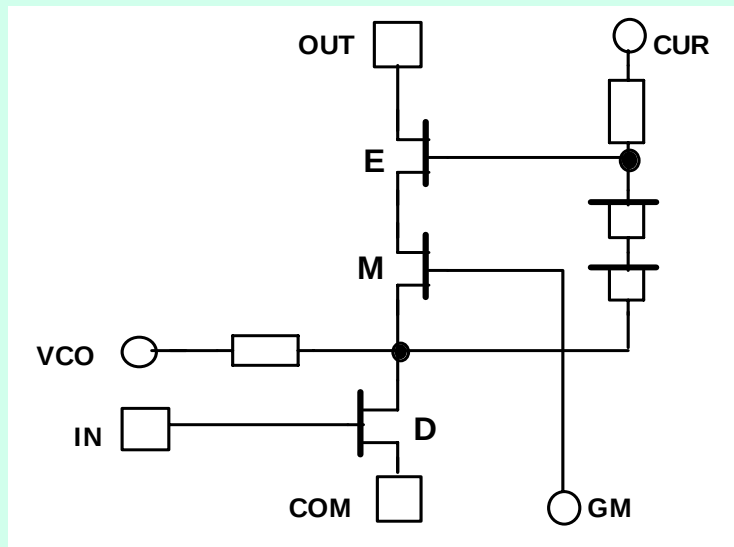
- Motivazioni: realizzazione di preamplificatori per applicazioni a ~ 77 K
- Caratteristiche del GaAs: virtuale assenza di congelamento di portatori (energia di ionizzazione di soli 3 meV)

Livello di drogaggio

Type of FET	M (elevato)			D (medio)			E (basso)		
Temperature	300 K	77 K	4 K	300 K	77 K	4 K	300 K	77 K	4 K
Threshold voltage [V]	-2.9	-2.0	-1.8	-1.1	-0.8V	-0.7	+0.05	+0.35	+0.4
Max. D-S op. voltage [V]	4.0	3.0	~ 2.0	5.0	4.0	~ 3.0	15	12	8
1/f factor H_f [10^{-26} Joule]	n/d	76	n/d	n/d	10	2.8	n/d	100	n/d

Elevata trasconduttanza Minimo rumore Massima tensione

Schema del SuperFET



□ Out ----> SuperDrain
 □ Com ----> SuperSource
 □ IN -----> SuperGate

Vco ----> Input FET bias
 Cur ----> Diode bias
 Gm -----> limits the leakage
 current.

I primi campioni di SuperFETs

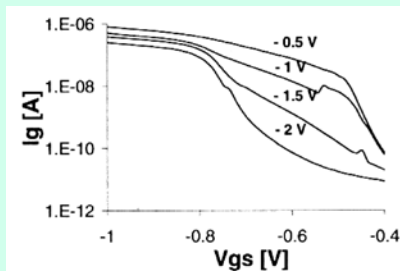
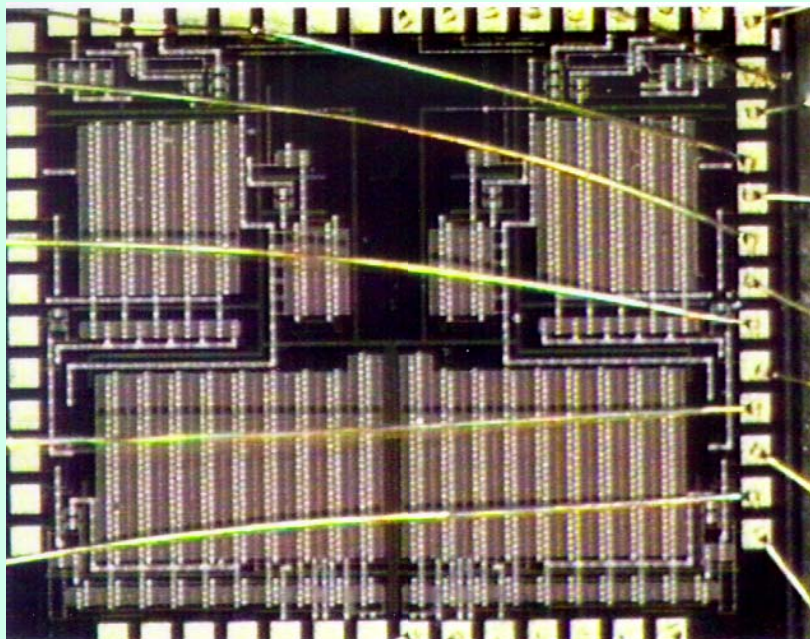


Fig 7: Gate current at 77 K as a function of V_{GS} , the potential of pad GM.

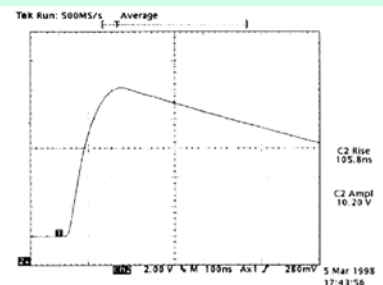


Fig 8: A 10 V amplitude pulse developed at the output of the test charge-sensitive preamplifier at 77 K.

- Rumore serie: $0.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a 77 K
- Impedenza d'uscita $\sim 1 \text{ Meg}$
- Trasconduttanza : 30 mA/V @ 1 mA
- Dinamica: superiore a 12 V
- Temperatura di operazione : 4 K -100K
- $W = 50000 \text{ }\mu\text{m}$

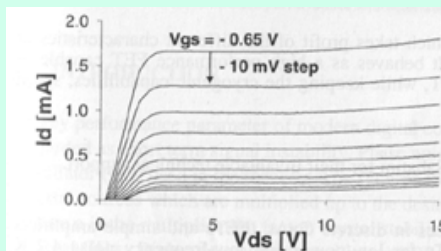


Fig 3: I_d - V_{ds} characteristics at 77 K. V_{gs} step is 10 mV. No bias at VCO used. At $I_d = 1 \text{ mA}$, g_m is $\sim 26 \text{ mS}$

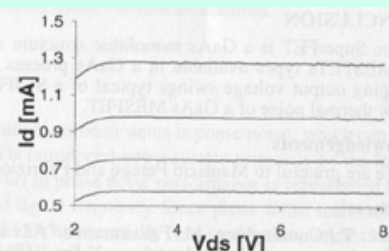


Fig 4: An expanded region of Fig 3 evidences a large dynamic output resistance ($R_{out} \sim 1 \text{ M}\Omega$).

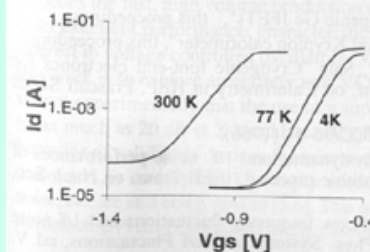


Fig 5: Transconductance characteristics at 300 K, 77 K and 4 K. $V_{ds} = 6 \text{ V}$. No bias current at VCO pad.

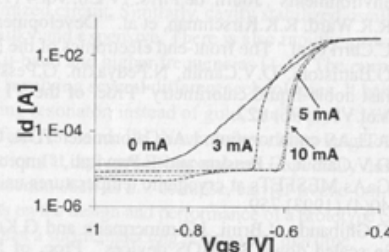


Fig 6: Transconductance characteristics at 77 K, for various external bias current at VCO. G_m/I_d ratio extends from 26 V^{-1} at 0 mA to 73 V^{-1} above 3 mA.

Il primo preamplificatore di carica basato sul SuperFET

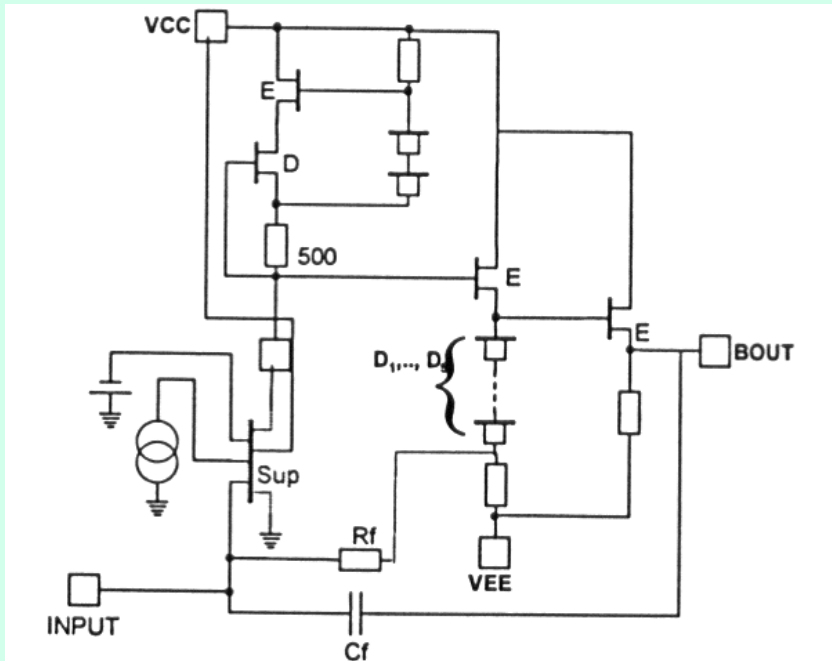


Fig 1: The circuit diagram of the cryogenic charge sensitive preamplifier.

Il preamplificatore basato sul SuperFET ha un elevato range dinamico, ca. 22 bit, e basso rumore, $0.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

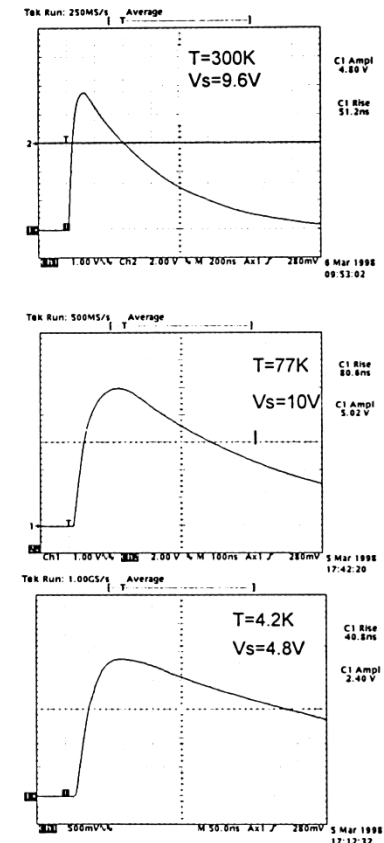
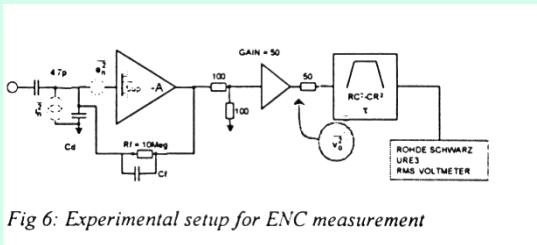


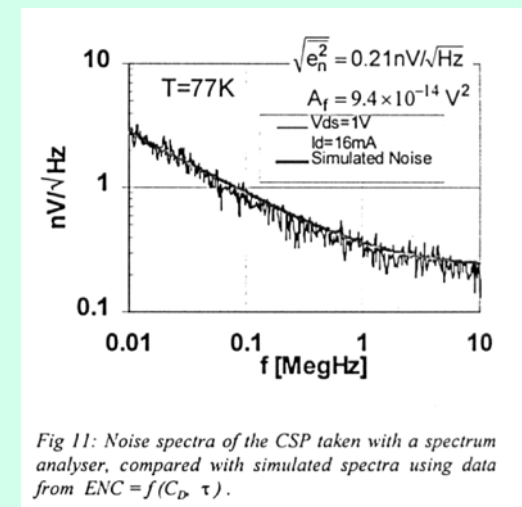
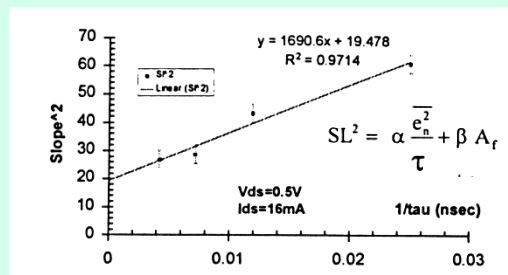
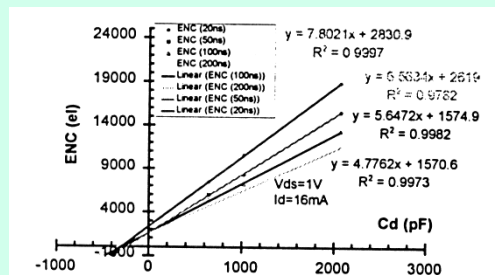
Fig. 5 Large signal response of the cryogenic charge-sensitive preamplifier.

Selected results of the SuperFET: misure di rumore



C'è un ottimo accordo fra il rumore misurato e quello calcolato: 0.21 nV/√Hz

$$ENC^2 = (C_d + C_i + C_f)^2 \left[\alpha \frac{e_n^2}{\tau} + \beta A_f \right] + \gamma \tau i_n^2$$



Sviluppo di JFETs al Germanio [3]

DEVELOPMENT OF CRYOGENIC GE JFETs – III

R. R. Ward,¹ R. K. Kirschman,^{1*} M. D. Jhabvala,² R. S. Babu,³ N. C. Das,⁴
D. V. Camin,⁵ V. Grassi,⁵ K. Kandiah,⁶ and J. J. Rosenberg⁷

¹Germanium Power Devices, Andover, Massachusetts, U.S.A

²NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, U.S.A.

³Ball Aerospace & Technologies Corp., Boulder, Colorado, U.S.A.

⁴Raytheon/STX, Lanham, Maryland, U.S.A.

⁵Physics Department of the University and INFN, Milan, Italy

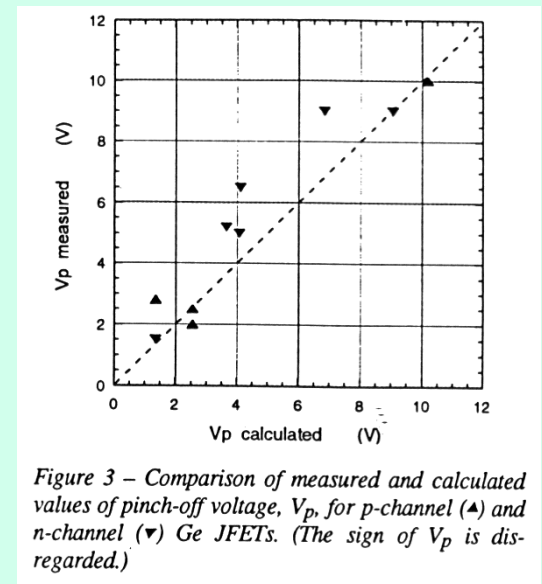
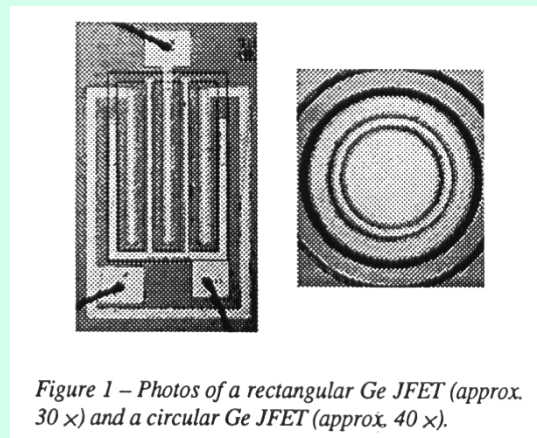
⁶Consultant, Sutton Courtenay, Oxon, U.K.

⁷Department of Engineering, Harvey Mudd College, Claremont, California, U.S.A.

*Also: Consulting Physicist, Mountain View, California, U.S.A.

Table 1 – Parameters of Ge JFETs for which results are presented. $L_g = 50 \mu\text{m}$ for A53G, A54G and 537L, for all others $L_g = 40 \mu\text{m}$. JFETs 524A, 526A, 529A and 537L are p-channel, all others are n-channel.

JFET	Geometry	Wg (μm)	Approx V_p at 77 K (V)	See Figures
25B	Rectangular	2 x 780	-3	6
518B, 520B	Rectangular	2 x 780	-9	7
524A	Circular	1450	+2.4	4
526A, 529A	Circular	1450	+1.5	10
537L	Circular	850	+1.1	10
791B	Rectangular	2 x 780	-1.4	8
807B, 809B	Rectangular	2 x 780	-9	7, 11
A53G, A54G	Circular	2730	-6	2a, 2b, 8
B09, B12A, B13A	Circular	1450	-5	9



Caratteristiche DC e Rumore

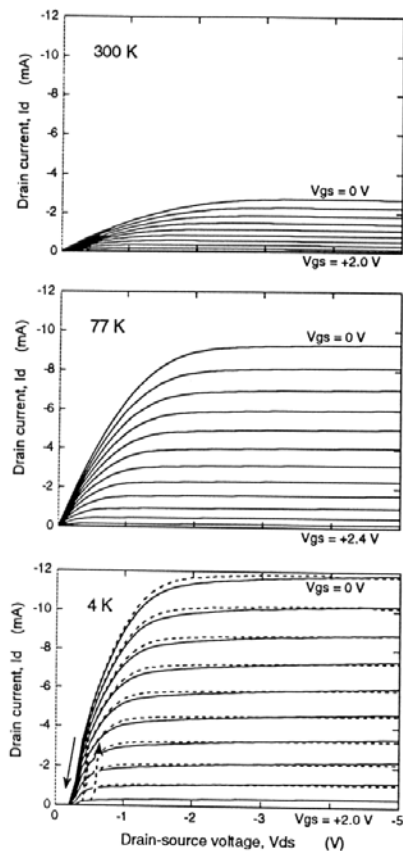


Figure 4 – Output characteristics of a p-channel Ge JFET (524A), exhibiting excellent characteristics down to liquid-helium temperature. For all plots $\Delta V_{gs} = 0.2$ V. This Ge JFET exhibits the typical channel conduction threshold in V_{ds} (-0.25 V for this JFET) and the associated hysteresis (at arrows).

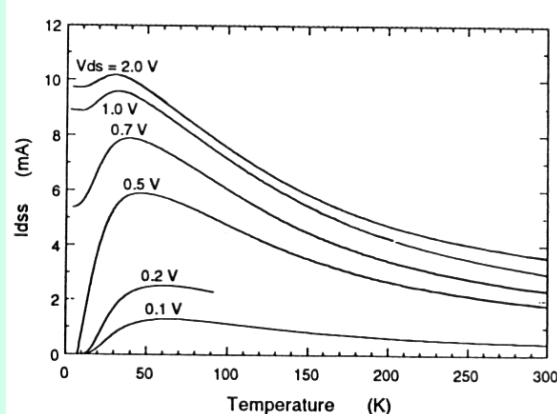


Figure 6 – Drain current for a Ge JFET (25B), illustrating a maximum around 30–60 K depending on V_{ds} , and conduction down to 2 K for $V_{ds} > \approx 0.6$ V.

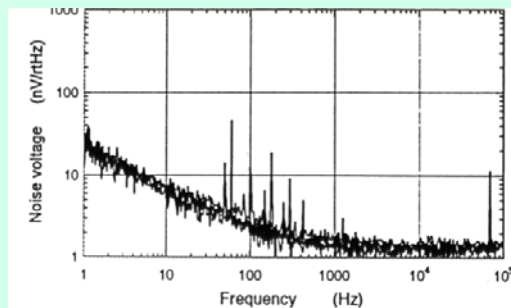


Figure 7 – Noise-voltage spectra for four n-channel Ge JFETs (518B, 520B, 807B, 809B) in liquid nitrogen. $V_{ds} = 1.2$ V, $I_d = 330$ μ A, $P = 400$ μ W.

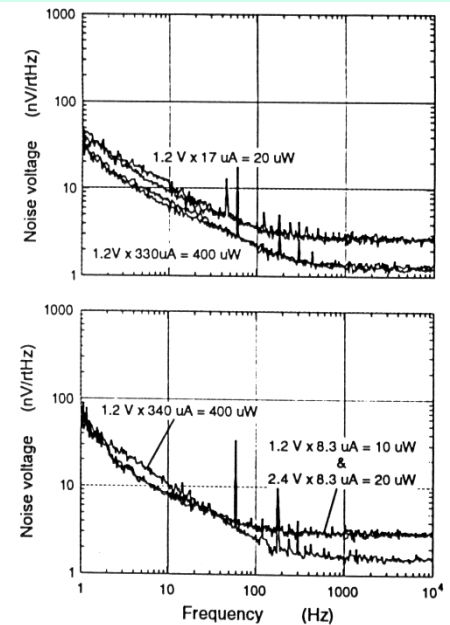


Figure 8 – Noise-voltage spectra for three n-channel Ge JFETs (top: A53G and A54G, bottom: 791B) in liquid nitrogen for power dissipation levels from 400 μ W down to 10 μ W. The numbers refer to V_{ds} , I_d , and power dissipation.

Misure di rumore, continuazione

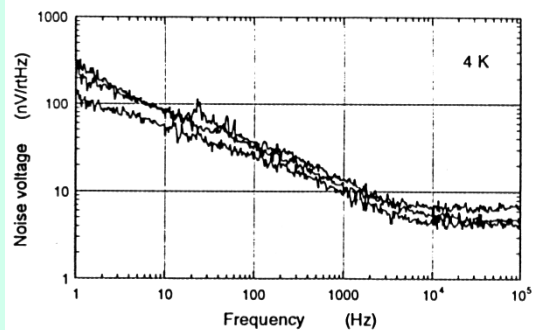


Figure 9 – Noise-voltage spectra for three *n*-channel Ge JFETs (B09A, B12A, B13A) in liquid helium. $V_{ds} = 1.2$ V, $I_d = 300$ μ A.

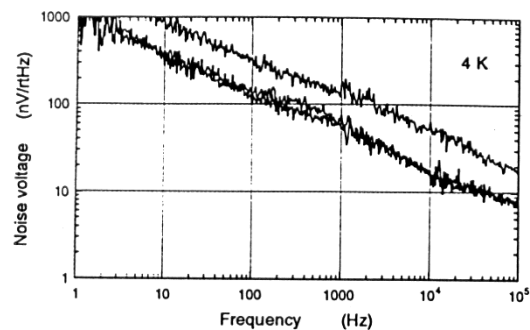


Figure 10 – Noise-voltage spectra for three *p*-channel Ge JFETs (S26A, S29A and S37L) in liquid helium. $V_{ds} = 1.2$ V, $I_d = 300$ μ A.

Table 2 – Summary of noise measurements of Ge JFETs and comparison to other FETs. See Table 1 for geometry and dimensions of the Ge JFETs.

FET	Temp (K)	Power (μ W)	K_f (μ V ² · μ m ²)	White level (nV/rtHz)	Figure or Reference
518B 520B 807B 809B	77	400	30	1.3	Fig 7
791B	77	400 10 & 20	~ 100 ~ 100	1.6 3.0	Fig 8
A53G A54G	77	400 20	~ 50 ~ 100	1.3 2.7	Fig 8
807B	77 30	400	70 300	1.4 1.7	Fig 11
TI Ge JFET	4	250 90	10* 100*	8 26	Ref 14**
NEC GaAs MESFET	4	360	20	1.4	Ref 12**
NASA Si JFET	77	60	10	3	Ref 15**

*On the basis of recent analysis of the Texas Instruments Ge JFET die, the estimate for gate area given in Ref. 1 (Table 1) was much too large, and thus the K_f values in Ref. 1 were also much too large.

**Also see Ref. 1, Table 1.

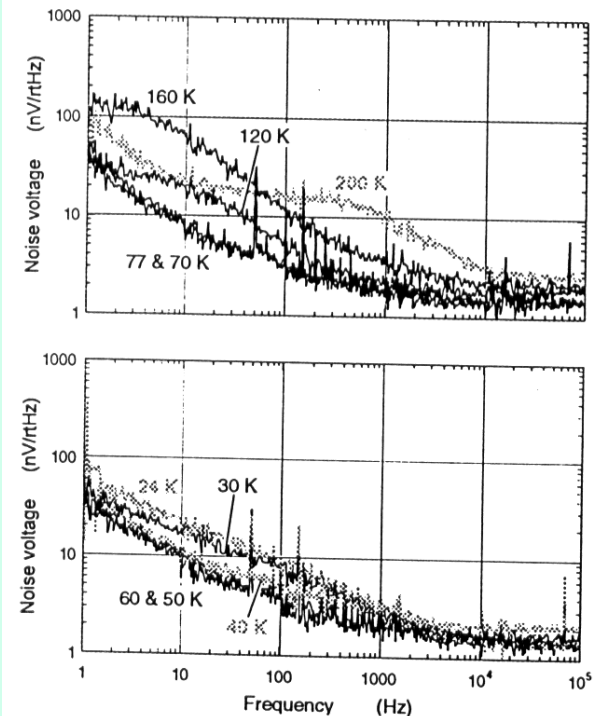


Figure 11 – Noise-voltage spectra for Ge JFET 807B at temperatures from 200 K to 24 K for $V_{ds} = 1.2$ V, $I_d = 300$ μ A. The spectra are split between two plots for clarity.

Conclusioni

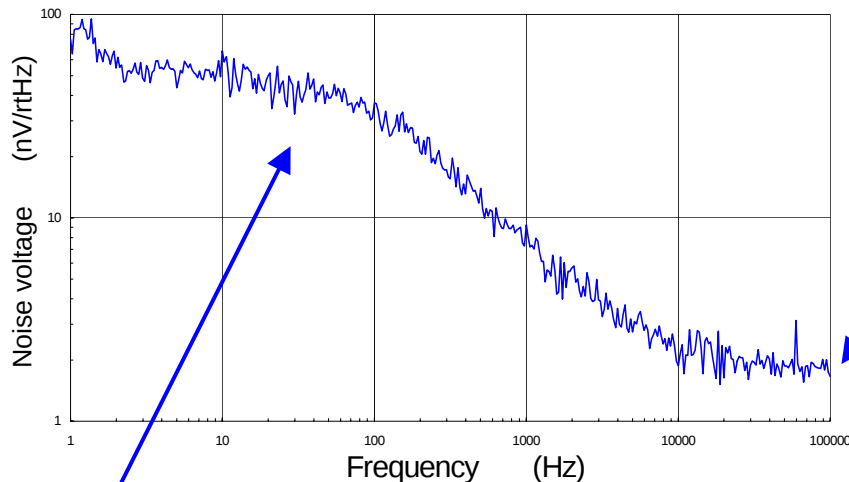
- Le caratteristiche DC sono ottime anche a 4 K
- Si osserva comunque a 4K una soglia nella V_{DS} sotto la quale non c'è conduzione di corrente per il totale congelamento dei portatori.
- La temperatura ottimale per il rumore si trova fra 30-60 K.
- Nello stesso range si trova anche il massimo della corrente I_d .
- In confronto con i SiJFETs, i JFETs al Ge presentano una temperatura ottimale molto inferiore (~ 30 K) agli 80 K in cui i JFETs cessano di condurre per il congelamento dei portatori.
- La maggior parte delle misure di rumore sono state fatte a Milano.

Indagine spettroscopica di JFETs al Germanio per applicazioni criogeniche mediante la analisi del rumore a bassa frequenza[4]

Introduzione alla Spettroscopia LFN VS T

TIPICA MISURA DI RUMORE DI UN JFET

$$S(f) = \sqrt{w^2 + \sum_{n=1}^k \frac{A_n \tau_n}{1 + (2\pi f \tau_n)^2}}$$



RUMORE BIANCO: ORIGINE TERMICA

**RUMORE LORENTZIANO (g-r) :
INTRAPPOLAMENTO E RILASSAMENTO
DEI PORTATORI DI CARICA**

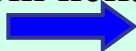
La costante di tempo caratteristica associata ad un processo GR dipende dalla temperatura, Shockley and Read 1952 [1]

Sah (1964) [2], dimostra che il rumore causato dal processo GR nella zona di svuotamento e la principale sorgente di rumore in un JFET, e calcola la costante di tempo associata ad un centro GR come:

$$\tau = \frac{1}{c_p(p_0 + p_1) + c_n(n_0 + n_1)}$$

$$p_1 = n_i \exp[(E_i - E_t)/kT] \quad n_1 = n_i \exp[(E_t - E_i)/kT]$$

dove $c_p = \sigma_p v_{tp} e$ $c_n = \sigma_n v_{tn}$

Assumendo che p_0 e n_0 , la concentrazione delle lacune e degli elettroni nella regione di svuotamento, siano trascurabili 

[1] W. Shockley, W. Read, Statistics of Recombination of Holes and Electrons, Physical Review, vol 87 N5, pp 835-842 (1952).

[2] C.T. Sah, Theory of Low Frequency Generation Noise in Junction Gate FET,

Proceedings of IEEE vol 52 (1964), pp 745-814.

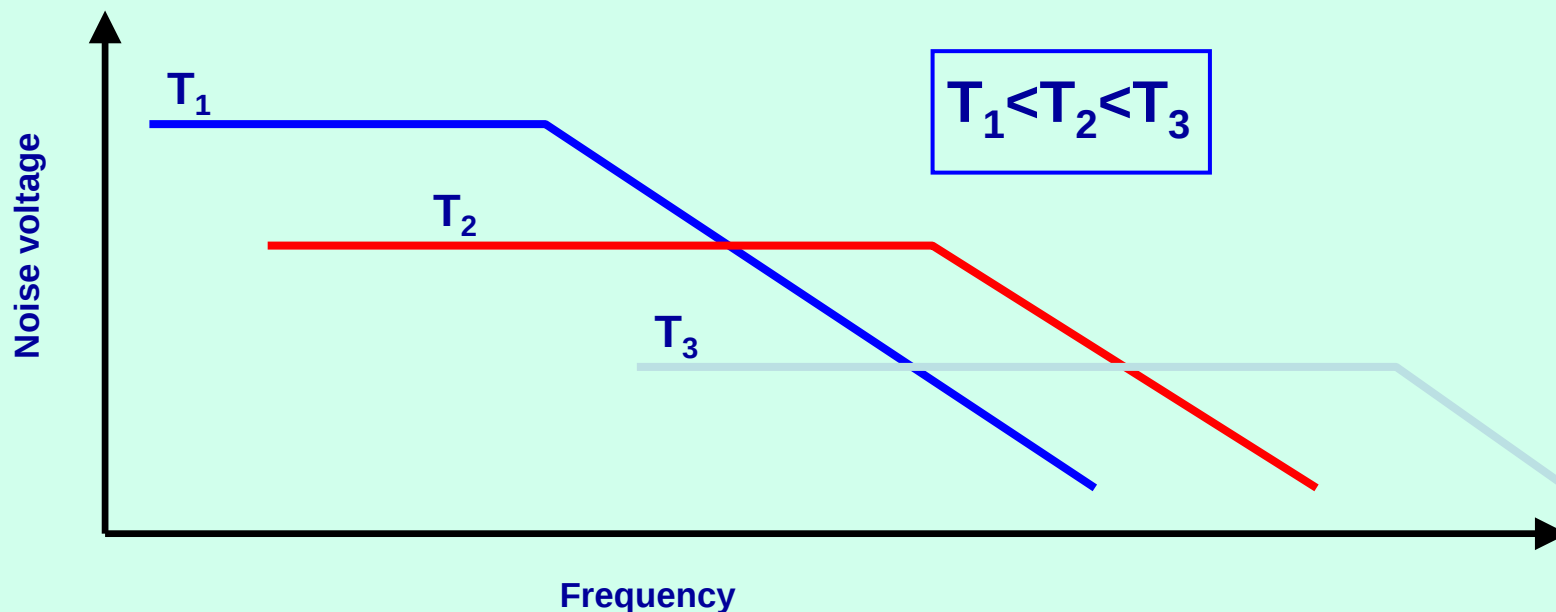
Introduzione alla Spettroscopia LFN vs T

La costante di tempo associata ad un centro GR può essere riscritta come :

$$\tau = \frac{1}{n_i \left\{ c_p \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) + c_n \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right\}}$$

La forte dipendenza dalla temperatura di τ è dovuta alla dipendenza dalla temperatura di n_i , il quale decresce al decrescere della temperatura

In termini di forma spettrale:



Scholz, Hwang and Schroeder (1988) [3] e successivamente Scholz and Roach (1992) [4], hanno sviluppato un metodo basato sulla analisi spettrale del rumore che consente di estrarre la energia di attivazione delle trappole al pari della tecnica DLTS:

Assumendo $E_t - E_i > 0$, moltiplicando entrambi i membri della equazione precedente per T^2 ed esplicitando n_i è possibile scrivere:

$$\ln(T^2 \tau) = \left(\frac{E_g / 2 - E_t + E_i}{kT} \right) - \ln \left[\left(\frac{4k^2 \sigma_n}{h^3} (6\pi^3 m_e^{1/2} m_h^{3/2})^{1/2} \right) \right]$$

e per: $E_t - E_i < 0$

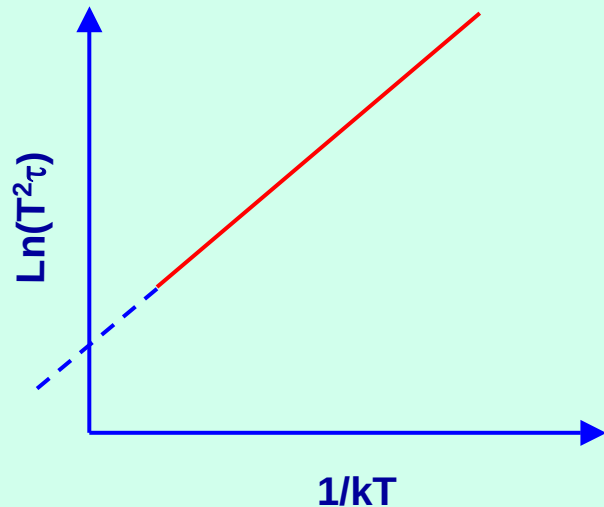
$$\ln(T^2 \tau) = \left(\frac{E_g / 2 + E_t - E_i}{kT} \right) - \ln \left[\left(\frac{4k^2 \sigma_p}{h^3} (6\pi^3 m_e^{3/2} m_h^{1/2})^{1/2} \right) \right]$$

[3]F. Scholz, J. Hwang and D. Schroder, Low Frequency Noise and DLTS as Semiconductor Characterization Tool,

Solid State Electron. Vol 31, N.2, pp 205-217, (1988).

[4]F. Scholz, J.Roach, Low Frequency Noise as tool for Characterization of Near-Band Impurities in Silicon, Solid State Electron. Vol 35, N.4, pp 447-452, (1992).

Arrhenius plot



$$E_i = \frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right)$$

$\ll E_t$

$$\Delta E = E_C - E_t$$

oppure

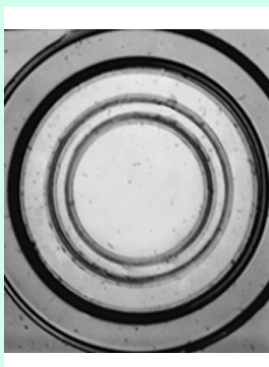
$$\Delta E = E_t - E_V$$

$$\ln(T^2 \tau) \approx \left(\frac{\Delta E}{k T} \right) - \ln \left[\left(\frac{4k^2 \sigma_n}{gh^3} (6\pi^3 m_e^{1/2} m_h^{3/2})^{1/2} \right) \right]$$

$$\ln(T^2 \tau) \approx \left(\frac{\Delta E}{k T} \right) - \ln \left[\left(\frac{4k^2 \sigma_p}{gh^3} (6\pi^3 m_e^{3/2} m_h^{1/2})^{1/2} \right) \right]$$

Risultati Sperimentali

Ge JFET CAMPIONE A74G[8]



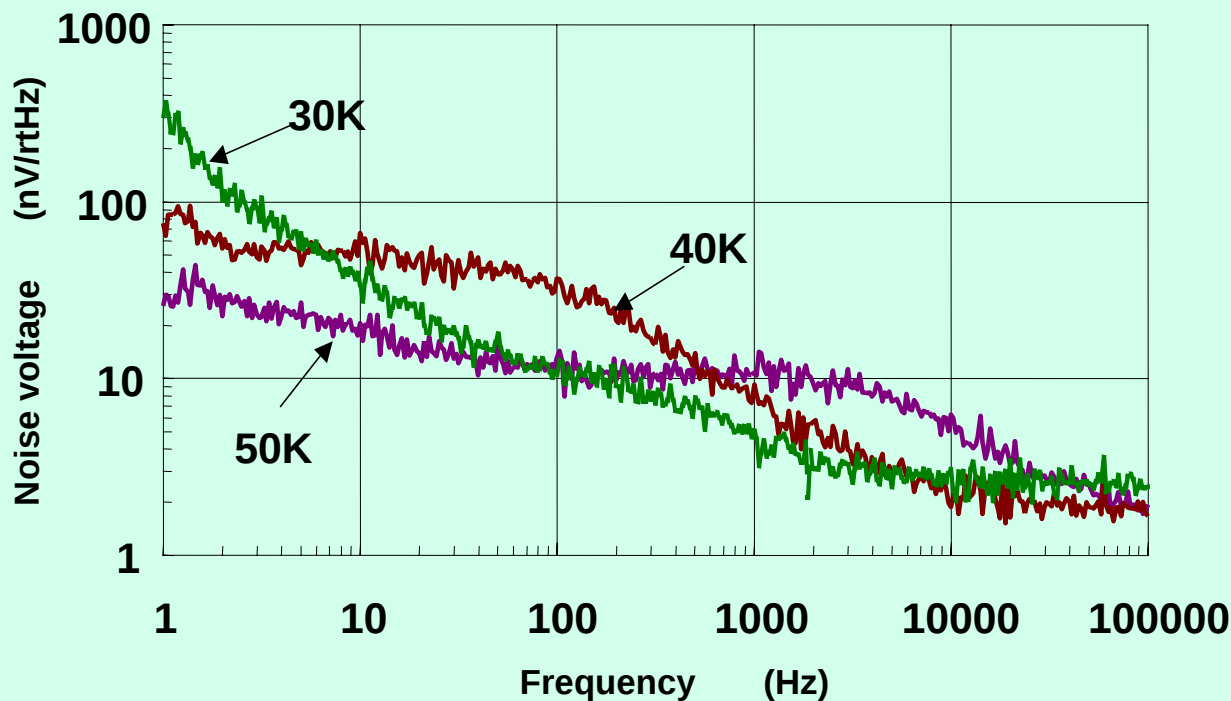
- CANALE n
- GEOMETRIA CIRCOLARE
- LUNGHEZZA DI GATE $50\mu m$
- LARGHEZZA DI GATE $2730\mu m$
- POLARIZZAZIONE: $I_d=330\mu A$ $V_{ds}=1.2V$
- POTENZA DISSIPATA: $400\mu W$

[8]R.R.Ward, R.K. Kirschman, M.D. Jhabvala, R.S. Babu, N.C. Das, D.V. Camin, V.Grassi ,K. Kandiah and J.J. Rosemberg, Development of Cryogenic Ge JFETs-III, 4th Workshop On Low Temperature Electronics, ESA Proceedings WPP-171 , pp 105-111 (2000).

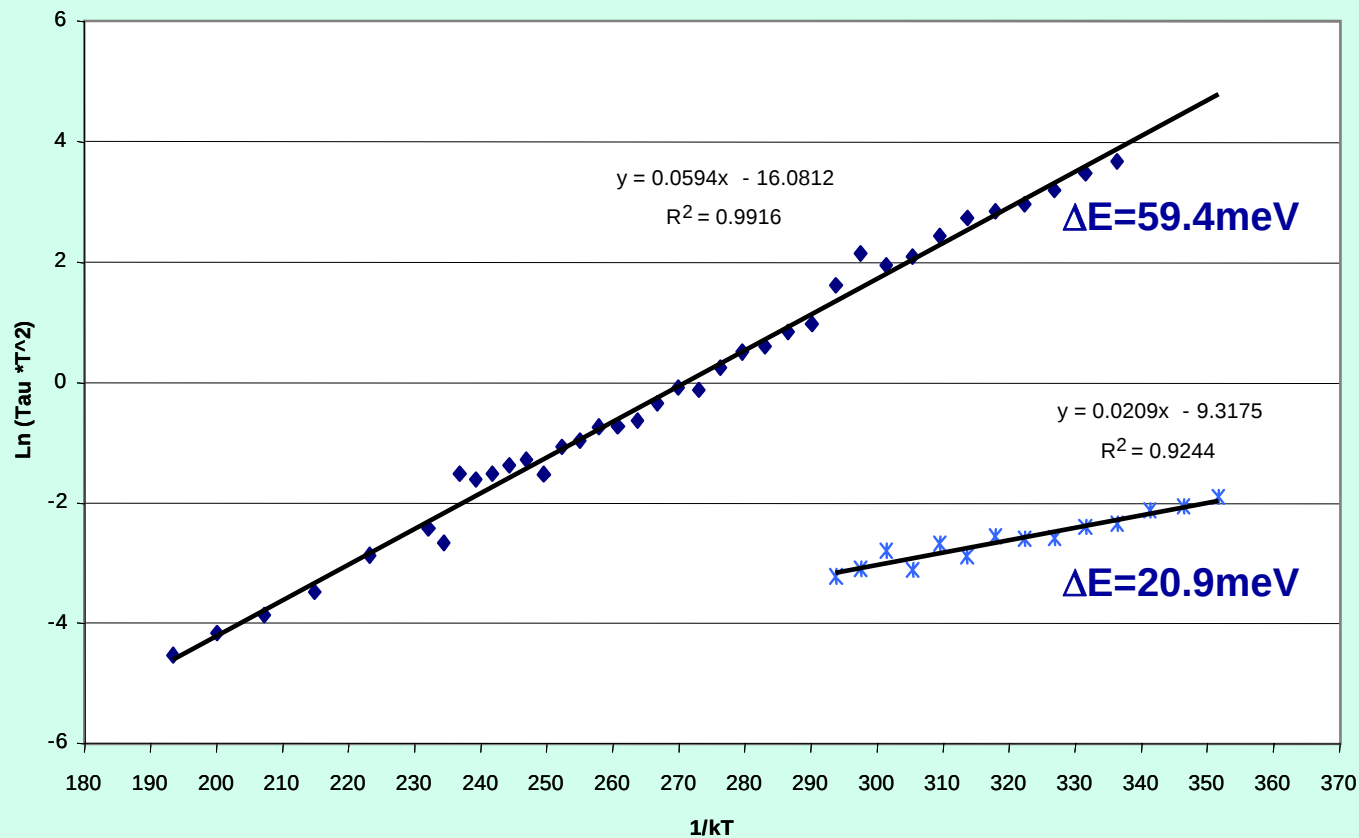
Risultati Sperimentali

Ge JFET campione A74G

RUMORE DI TIPO LORENTZIANO NELL'INTERVALLO 30K-50K



ARRHENIUS PLOTS (Ge JFET campione A74G)



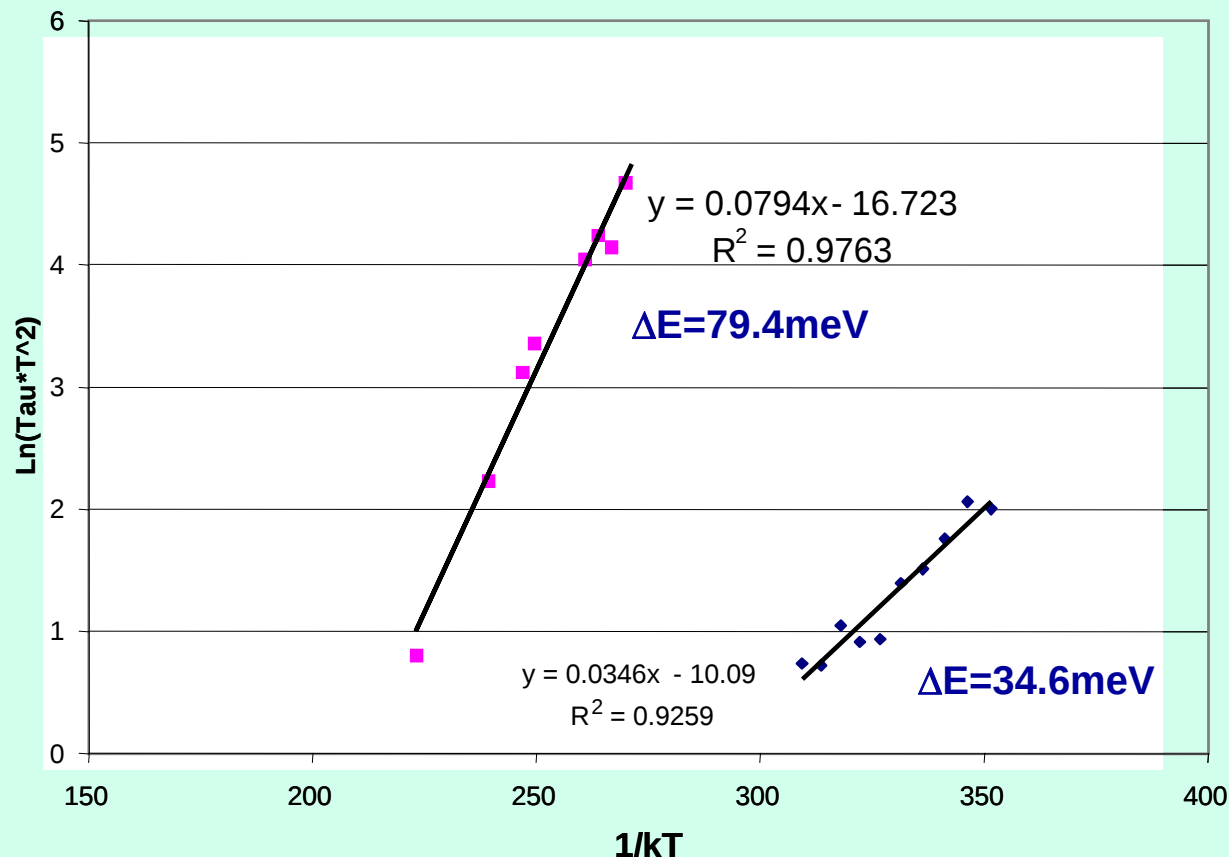
**DA MILNES E
SZE:**
Ev + 60 meV

**LIVELLO
ACCETTORE DEL
BERILLIO**

Ev + 20 meV

**LIVELLO
ACCETTORE DEL
BERILLIO**

ARRHENIUS PLOTS (Ge JFET campione A74G)



Ev + 37 meV

**LIVELLO
ACCETTORE DEL
RAME**

(ODLTS)[9]

Ev + 72 meV

**LIVELLO
ACCETTORE DEL
GALLIO**

(SZE)

Ev + 71 meV

**LIVELLO
ACCETTORE
DELL'IDROGENO**

(ODLTS)[9]

[9]A. Blondeel, P. Clauws and D. Wincke, Optical Deep Level Transient Spectroscopy of minor Carrier Traps in n-type HP Germanium, J. Appl. Phys., Vol 81, No 10, May 1997.

Conclusioni

- La tecnica spettroscopica LFN vs T e' stata decisamente migliorata.
- I JFETs al Ge indagati mostrano la possibilita' di operare sino a 2K e mostrano rumore accettabile sino a 30 K.
- Mediante la spettroscopia LFN vs T abbiamo determinato la natura delle trappole generanti rumore Lorentziano nel range 30K-50K.
- La spettroscopia di rumore LFN vs T si e' dimostrata una tecnica adatta alla determinazione dei contaminanti nel processo di fabbricazione di JFETs a basso rumore.

Alcuni riferimenti che riguardano la spettroscopia LFN vs T

- [1] D.V. Camin, G.Pessina and E.Previtali.
“The SuperFET: a High Performance GaAs Voltage-Controlled Current Source for Cryogenic Applications”
Journal de Physique IV, Pr3, vol 8, (1998) pp.167-170.
- [2] D.V. Camin, C.F.Colombo, V.Grassi and G.Pessina.
“A Cryogenic Charge-sensitive Preamplifier based on the ‘SuperFET’ structure”.
ESA Proceedings WPP-171 (2000) pp.143-147.
- [3] R.R. Ward , R.Kirschman, D.V.Camin, V. Grassi et al, **“Development of Cryogenic Ge JFETs –III”**, Proc. of ESA, WPP-171 (2000), pp.105-111
- [4] V.Grassi, C.F.Colombo, and D.V. Camin, " **Low Frequency Noise versus Temperature Spectroscopy of recently designed Ge JFETs** ", *IEEE Trans. on Electr. Dev.*, vol. 48 (12) (2001) 2899 -2905.