



INAF - ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA  
ISTITUTO DI RADIOASTRONOMIA

# **Generatori di Rumore Criogenici:**

*Sergio Mariotti*

**Rapporto Interno IRA 477 / 2014**

Revisore: Sandro Orfei

<b>GENERATORI DI RUMORE CRIOGENICI:</b> .....	<b>1</b>
<b>1. OBIETTIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>2. DIODI ZENER IN CRIOGENIA</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. SETUP CRIOGENICO</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2. RISULTATI</b> .....	<b>3</b>
<b>3. DIODI GENERATORI DI RUMORE IN FORMATO CHIP</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1. PANORAMICA DI MERCATO</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2. CARATTERIZZAZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>4. GENERATORE DI RUMORE IN CRIOGENIA</b> .....	<b>6</b>
<b>4.1. MORFOLOGIA DEL GENERATORE DI RUMORE</b> .....	<b>6</b>
<b>4.2. SETUP DI MISURA CRIOGENICO</b> .....	<b>8</b>
<b>4.3. RISULTATI</b> .....	<b>10</b>
<b>5. CONCLUSIONI</b> .....	<b>12</b>
<b>6. RINGRAZIAMENTI</b> .....	<b>12</b>

# 1. Obiettivo

L'obiettivo del presente report è quello di determinare se e come funzionano in ambiente criogenico i generatori di rumore basati sull'uso del diodo Zener.

Poiché nei front-end per Radioastronomia il diodo Zener viene utilizzato, in contesti diversi (ad es. per proteggere dalle sovratensioni), verrà analizzato pure il comportamento in DC del diodo Zener stesso.

## 2. Diodi Zener in criogenia

### 2.1. Setup criogenico

Sono stati raffreddati criogenicamente due comuni diodi Zener utilizzati come riferimento di tensione.

P/N BZX55C2V4 Vz=2.4 V, P= 500 mW, contenitore DO-35 cilindrico vetroso

P/N BZX55C3V6 Vz=3.6 V, P= 500 mW, contenitore DO-35 cilindrico vetroso

Per il raffreddamento si è utilizzato il criostato di laboratorio del MedRT. I diodi, vetrosi e fragili, sono stati fissati termicamente al piano freddo tramite il nastro adesivo in Alluminio il quale è un eccellente conduttore di calore, morbido da non distruggere i diodi, e comodo da utilizzare. I fili di alimentazione impiegati erano sufficientemente lunghi e sottili tali da ridurre fortemente il flusso di calore.

Gli stessi fili, sono stati agganciati termicamente "clamped" alla piastra fredda, in prossimità del diodo Zener, con un generoso utilizzo di nastro di Alluminio. Tale operazione garantisce viepiù il raffreddamento dei reofori del diodo Zener, soprattutto alla luce del fatto che il contenitore in vetro potrebbe comportarsi come un isolante termico.

### 2.2. Risultati

Il primo risultato è che i due diodi Zener funzionano in criogenia; sia se polarizzati "inversi" cioè in condizioni di "breakdown", sia in polarizzazione diretta.

Di seguito vengono riportati in tabella e grafici che mostrano analiticamente i risultati.

	Temp [K]		Temp [K]		dV / dT	
	27		295		27 [K]	
	2V4	3V6	2V4	3V6	2V4	3V6
[mA]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V/K]	[V/K]
<i>Inverse Conduction (Zener)</i>						
	2V4-27	3V6-27	2V4-295	3V6-295		
1	2.23	3.49	1.838	2.931	-1.5E-3	-2.1E-3
3	2.61	3.94	2.146	3.340	-1.7E-3	-2.2E-3
5	2.80	4.13	2.311	3.550	-1.8E-3	-2.2E-3
7	2.94	4.24	2.426	3.690	-1.9E-3	-2.1E-3
10	3.09	4.34	2.552	3.840	-2.0E-3	-1.9E-3
<i>Direct conduction</i>						
5	1.040	1.070	0.755	0.770	-1.1E-3	-1.1E-3
10	1.060	1.086	0.781	0.798	-1.0E-3	-1.1E-3

Tab 2.2.1 Caratteristica I-V di diodi Zener

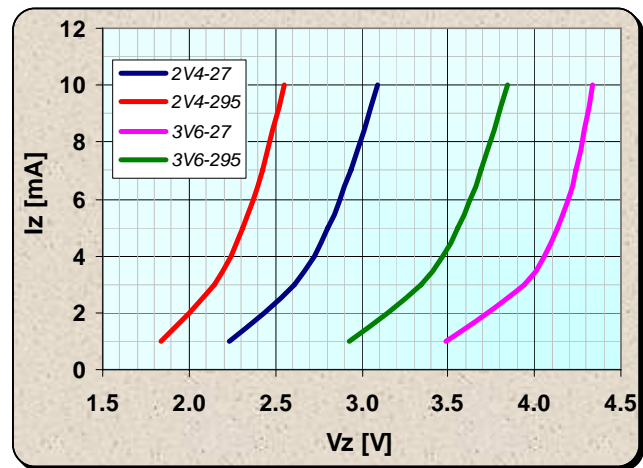


Fig. 2.2.2 Caratteristica I-V di diodi Zener

Come si evince chiaramente dal grafico di Fig. 2.2.2, in criogenia, il fenomeno *breakdown* (cioè l'effetto Zener) persiste ma la tensione relativa aumenta.




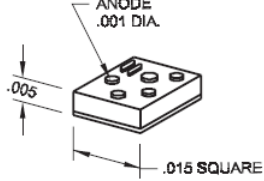
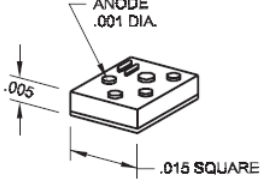
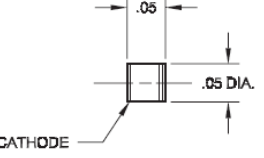
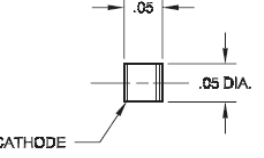
Dalla tab. 2.2.1 si evince pure che in criogenia, e polarizzando il diodo Zener in diretta, la tensione di soglia, ha un comportamento simile a quello che ci si aspetta per una comune giunzione P-N al Si.

# 3. Diodi Generatori di rumore in formato chip

## 3.1. Panoramica di mercato

Nell'ottica di integrare i generatori di rumore in *Front End Modules* oppure di auto costruire i generatori di rumore, sono stati cercati sul mercato i diodi Zener appositamente venduti per generare rumore e tali da avere forma e dimensioni adatti ad operare nella banda di interesse (33...50 GHz).

I marchi commerciali ed i modelli presi in esame sono elencati nella tabella sottostante:

			
<b>Contenitore die /chip</b>	 <p><b>NC 404-CH3</b>            Vz: 8...12V, I: 15 mA            ENR: 20...25 dB            Piazzole <math>\Phi</math> 25 <math>\mu</math>m:            difficilissima la bondatura.            Ls &gt; 0.30nH</p>	 <p><b>NW 404-C</b>            Vz: 8...12V, I: 15 mA            ENR: 20...25 dB            Piazzole <math>\Phi</math> 25 <math>\mu</math>m:            difficilissima la bondatura.            Ls &gt; 0.30nH .            Non piú disponibile</p>	Non disponibile
<b>Contenitore cilindrico</b>	 <p><b>NC 404-C50</b>            Vz: 8...12V, I: 15 mA            ENR: 20...25 dB</p> <p><math>C_p=0.13</math> pF TYP.  <math>L_s=0.40</math> nH TYP.</p>	 <p><b>NW 404-P50</b>            Vz: 8...12V, I: 15 mA            ENR: 20...25 dB.            Non piú disponibile</p> <p><math>C_p=0.13</math> pF TYP.  <math>L_s=0.40</math> nH TYP.</p>	Non disponibile

Tab. 3.1.1 Panoramica di mercato

## 3.2. caratterizzazione

Il mod. NW 404-C di cui si possiede una campionatura, è stato caratterizzato in DC alla temperatura ambiente ed i dati sono riportati nel seguente grafico

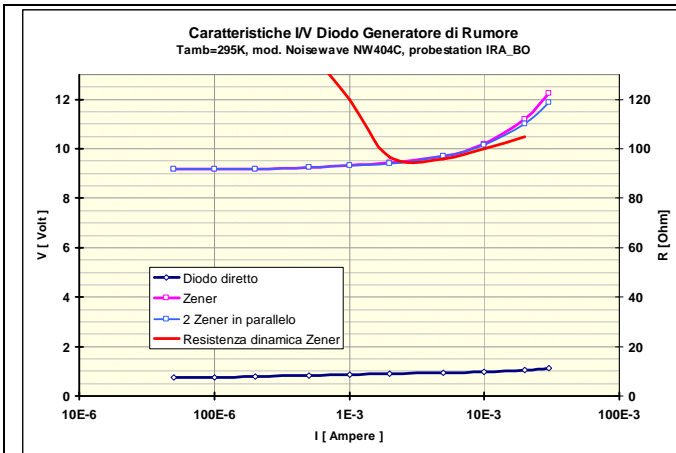


Fig. 3.1.2 caratteristiche I/V dello Zener chip die NW404-C03

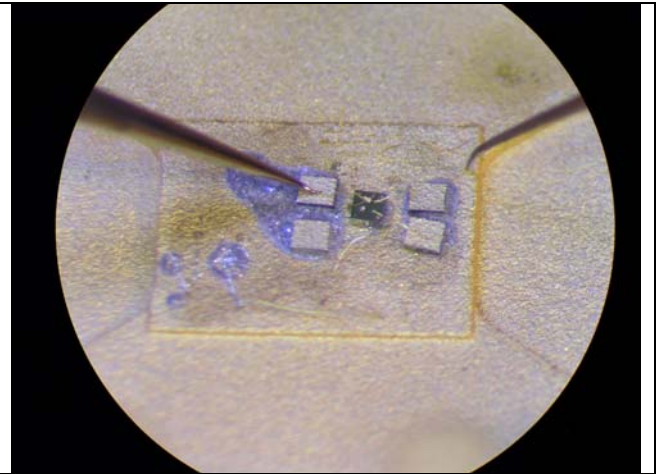


Fig. 3.1.3 Misura sperimentale I/V dello Zener chip die NW404-C03 con probe station

La due criticità maggiori riscontrate durante la fase di misura sono state entrambe associate al processo di “bondatura” (*wire bonding*).

Dimensioni delle piazzole di collegamento.

Il diametro è inferiore a quello consentito per il più sottile filo per *bonding* presente sul mercato (17  $\mu\text{m}$ ). Indicativamente, una piazzola adatta ad un filo di diametro 17  $\mu\text{m}$  dovrebbe presentare dimensioni pari ad almeno 30 x 40  $\mu\text{m}$ , sensibilmente più grandi della piazzola disponibile che ha un diametro di soli 25  $\mu\text{m}$ .

Lunghezza filo.

La lunghezza del filo dipende dall'architettura di montaggio, tuttavia è difficile scendere al disotto di 300 $\mu\text{m}$  il che produrrebbe una inevitabile induttanza parassita di almeno 0.3 nH.

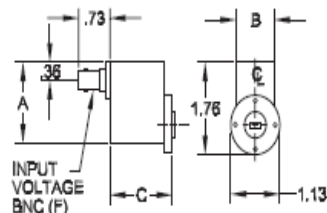
## 4. Generatore di rumore in criogenia

### 4.1. Morfologia del generatore di rumore

E' stato deciso sperimentare il funzionamento alle temperature criogeniche di un generatore di rumore commerciale per una banda di frequenza di prossimo interesse. Poiché il primo raffreddamento criogenico di un costoso generatore di rumore costruisce un rischio, è stato scelto di utilizzare come "cavia" sacrificabile un generatore di rumore marca Noise/com mod. NC 5222 opz 15, presente in laboratorio da anni e non utilizzato.

Le caratteristiche principali ed i dati di targa sono i seguenti:

Waveguide	DIM	DIM	DIM
	A (in.)	B (in.)	C (in.)
WR22	1.51	0.75	1.31
WR19	1.51	0.75	1.31



NC 5222 opt 15		V=15V	I=8mA
Freq. GHz	ENR dB	Freq. GHz	ENR dB
33	22.38	42	22.00
34	22.08	44	23.51
36	22.07	46	23.16
38	21.96	48	22.01
40	21.49	50	21.43

Fig. 4.1.1 dimensioni generatore di rumore

Tab. 4.1.2 Dati di targa

Prima di procedere al raffreddamento criogenico del generatore di rumore, si è reso necessario aprirlo e smontare ogni sua parte interna per poter analizzare l'eventuale presenza di elementi palesemente incompatibili con il raffreddamento criogenico.

Se all'interno del corpo del generatore di rumore, ad esempio, fossero impiegati circuiti integrati bipolari oppure condensatori elettrolitici, il non funzionamento in criogenia sarebbe certo.

Se all'interno del corpo del generatore di rumore, ad esempio, fossero impiegate tecniche di assemblaggio tali da non sopportare la dilatazione differenziale durante il raffreddamento, la rottura sarebbe certa.

Si è pertanto proceduto ad una operazione cosiddetta "reverse engineering", cioè lo smontaggio, pezzo per pezzo, fino a raggiungere il semiconduttore intimo.

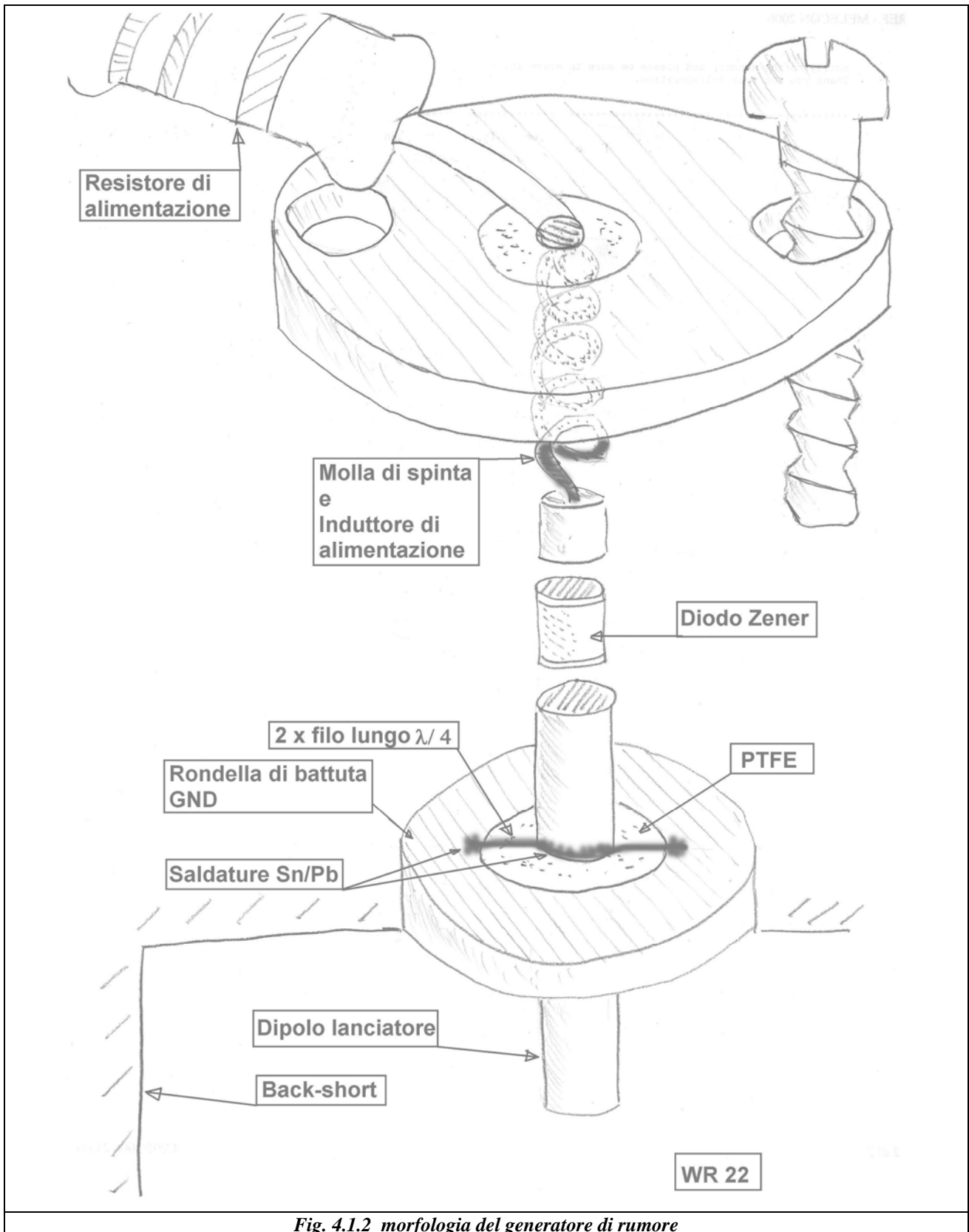
In particolare è emerso che il circuito elettrico DC è molto semplice, un connettore BNC alimenta una serie resistore + diodo Zener. il cui anodo è collegato a massa.

Da un punto di vista RF, il collegamento dell'anodo alla massa avviene tramite due linee  $\lambda/4$  in parallelo fra loro. Quindi l'anodo è "caldo" per la RF ed è "freddo" per la DC.

Il diodo Zener e la molla di spinta / induttore sono circondati da un cilindro cavo (cioè un toroide), non disegnato per semplicità, costituito di materiale ferromagnetico (ferrite o "Eccosorb" non meglio identificati). La presenza di tale materiale evita la propagazione del rumore in RF a ritroso verso la linea di alimentazione.

La piazzola circolare del diodo Zener che costituisce il contatto di anodo, prosegue tramite un cilindretto in Be/Cu di pari diametro divenendo di fatto il dipolo (lanciatore) della guida d'onda WR22. Tale assemblaggio, che è costituito da pezzi impilati l'uno sull'altro, è mantenuto insieme ed in contatto da una molla di spinta la quale, da un lato preme sul contatto di catodo dall'altro lato è trattenuta da una rondella avvitata alle pareti del corpo metallico esterno.

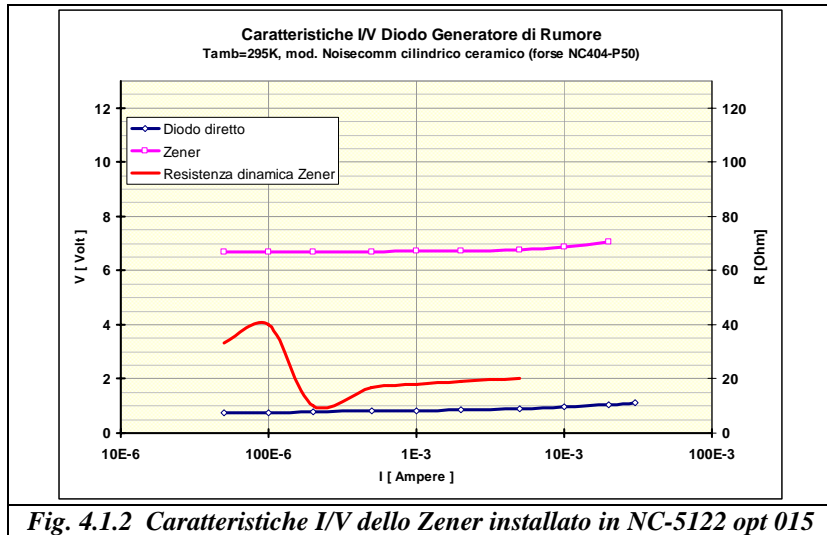
E' evidente che tale assemblaggio, per sua natura è libero di strisciare lungo l'asse, quindi risulta tollerante alle dilatazioni termiche differenziali che è esattamente ciò che si sperava di trovare.



**Fig. 4.1.2 morfologia del generatore di rumore**

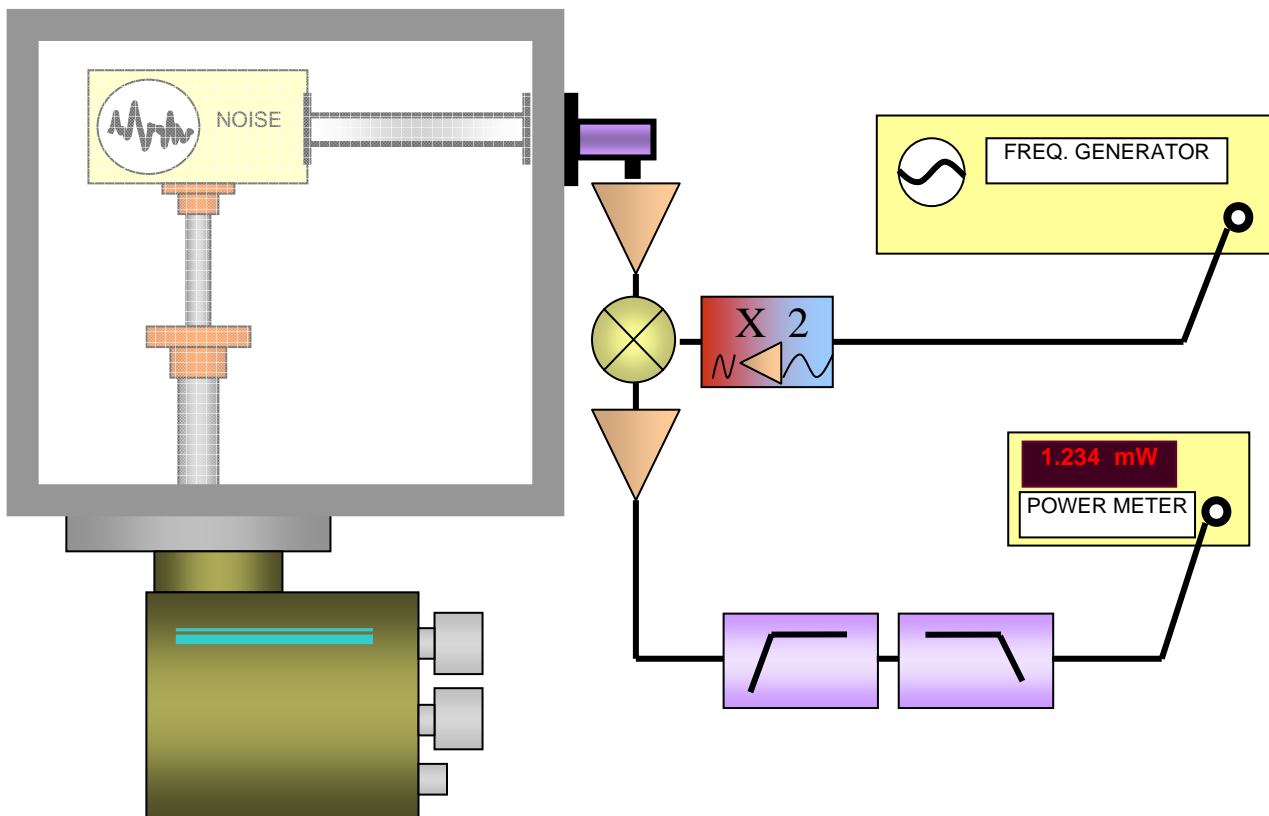
Il diodo Zener è stato alimentato sia in polarizzazione diretta, sia inversa e ne sono state tracciate le curve caratteristiche.

Come si evince dal confronto fra la seguente fig.4.1.2 e le caratteristiche dello Zener chip die di fig. 3.1.2 , i due diodi esaminati appaiono diversi fra loro.



## 4.2. Setup di misura criogenico

La prova sperimentale di raffreddamento è stata condotta secondo lo schema indicato in figura



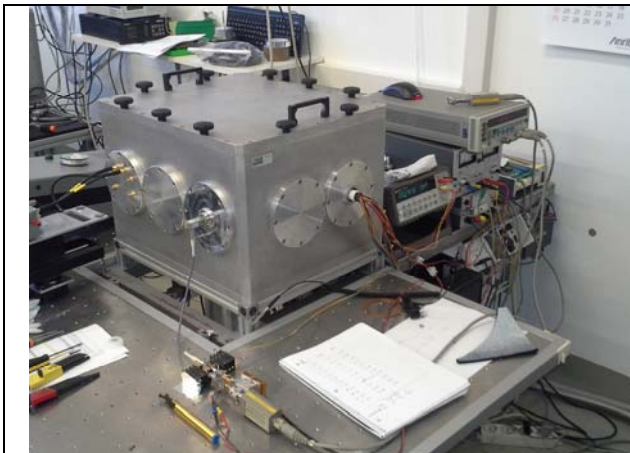
*Fig. 4.2.1 setup di misura*

Oggetto	NC5222	Guida	Curva	Guida	Finestra	WR/coax	cavo coax	LNA	Mixer	LNA	HPF	LPF	attenuatore	Wattmetro
Marchio	Noise/com				Aeroflex	Agilent	W.L.Gore	Miteq	Marky	Amplifonix	MCL	MCL		hp 8481D
Materiale		SS/Au	Cu	SS	Al	Al	GoreTex							
media	WR22	WR22	WR22	WR22	WR22		2.4mm	2.4 mm	2.4/SMA	SMA	SMA	SMA	SMA	N
lunghezza		150mm	N/A	150 mm			300 mm							
T	20	20-160	160	160-300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
G	N/A	-1	-0.2	-1.5	-0.1	-0.1	-1.5	20	-8	35	-0.5	-5	-10	
NF								4.5	8	1.5				
Banda	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q to VHF	10-500M	25 MHz	250 MHz		
Dinamica														-70...-20

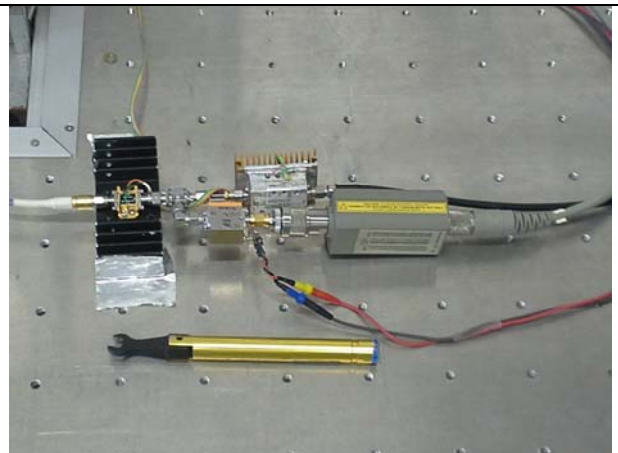
*Tab. 4.2.2 setup di misura testuale*



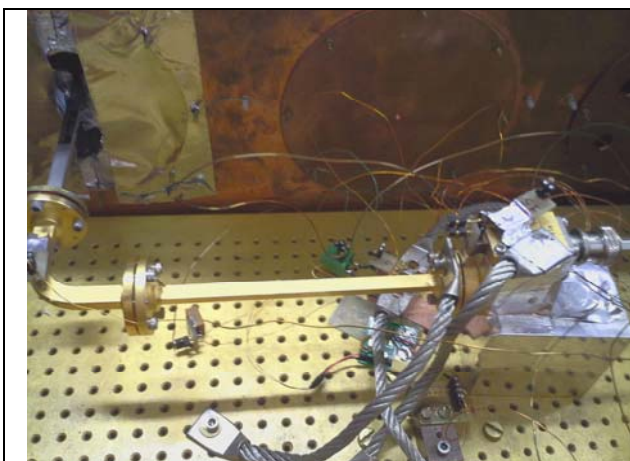
Le misure sperimentali sono state condotte presso l'Università Milano Bicocca, facoltà di Fisica, ove è presente un criostato di laboratorio attrezzato con la necessaria finestra in WR22.



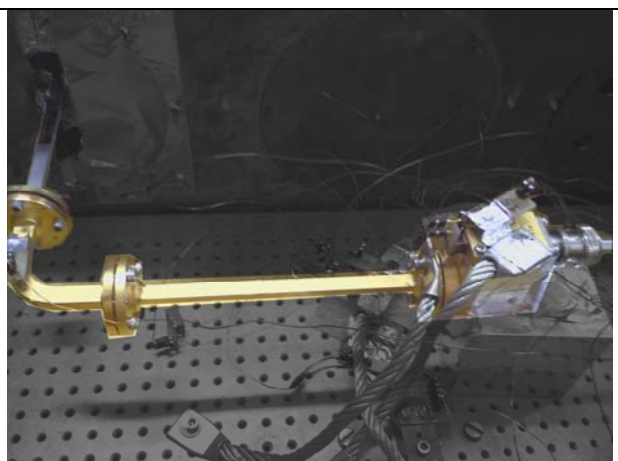
*Fig. 4.2.3 Criostato e strumentazione*



*Fig. 4.2.4 Convertitore a basso rumore*



*Fig. 4.2.5 Interno criostato*



*Fig. 4.2.6 Interno criostato (evidenziato)*

La misura radioelettrica sperimentale principale e sufficiente è stata la misura di potenza di rumore. A complemento di questa sono state effettuate altre misure, ritenute utili, in base della strumentazione disponibile in laboratorio.

Misure effettuate:

- ENR @ 8K, 22K, 77K, 300K
- $dENR/dV$
- $dENR/dI$
- $dENR/dT$
- Allan Var
- colore (solo wide band)

In particolare, la potenza di rumore è stata osservata come rapporto di potenze ON/OFF (Y-factor). ENR ed Y-factor sono legati da una relazione matematica lineare e biunivoca, tuttavia non verrà determinato ENR in modo accurato in quanto sarebbe necessaria una campagna lunga, complicata ed onerosa atta a determinare in modo molto accurato le NF del convertitore ed i contributi di rumore delle guide d'onda. In altre parole sono state adottate le seguenti approssimazioni: il valore  $T_c$  è approssimato al valore di temperatura fisica, l'attenuazione del percorso Generatore-di-Rumore – LNA è stimata,  $T_e$  è approssimato al valore di targa del LNA / convertitore.

Le relazioni adottate sono le seguenti:

Definite:

$T_h$  : Temperatura hot, la temperatura più calda al piano di misura

$T_c$  : Temperatura cold, la temperatura più fredda al piano di misura

Te: Temperatura equivalente di rumore all'ingresso di un quadripolo attivo (ad es LNA)  
 Y: Rapporto di potenza all'uscita della catena commutando l'ingresso fra Th e Tc

Dalla nota relazione:

$$Te = \frac{Th - Y \cdot Tc}{Y - 1}, \text{ dopo alcuni passaggi si ottiene: } Th + Te = Y(Tc + Te)$$

per  $Th \gg Te$  (caso pratico) si può scrivere  $Th \cong Y(Tc + Te)$

Dalla definizione di ENR :  $Th = Tc + 290 \cdot 10^{(ENR/10)}$

Ne consegue che:  $ENR = 10 \cdot \log\left(\frac{Y \cdot (Tc + Te) - Tc}{290}\right)$

I dati, raccolti nel dominio della frequenza, sono stati acquisiti a quattro temperature fisiche significative, 8K, 22K, 77K, 300K.

### 4.3. Risultati

Il seguente grafico mostra l'andamento del ENR in funzione di freq. con parametro la temperatura di funzionamento. Le misure a 300K sono state eseguite due volte, ad inizio ciclo ed a fine ciclo al fine di provare la ripetibilità.

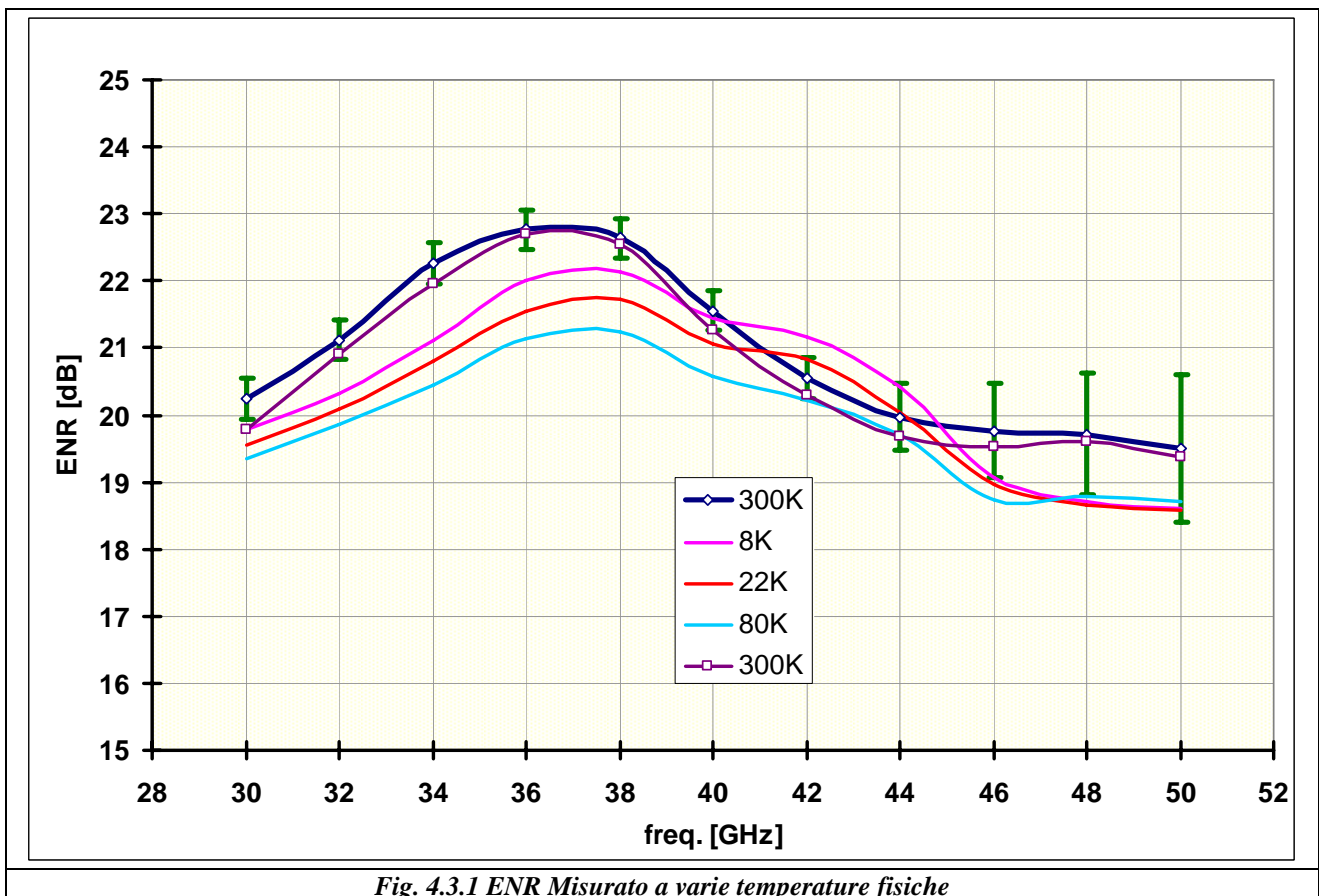


Fig. 4.3.1 ENR Misurato a varie temperature fisiche

Come si può notare dal grafico, i valori ENR rimangono "relativamente stabili" al variare della temperatura fisica. La dicitura "relativamente stabili" è riferita al fatto che per un ENR il cui valor medio vale circa 21 dB, una variazione di circa 1..2 dB fra temperatura ambiente e criogenia è da considerarsi una "piccola" variazione.

L'incertezza di misura, è visualizzata sul grafico solamente sulla curva relativa a 300K per comodità, ma si deve considerare associata a ciascuna curva.

L'aumento di incertezza in corrispondenza delle frequenze più elevate è relativo al fatto che il setup di misura è meno performante e meno ripetibile a tali frequenze.

La sensibilità della potenza al variare della tensione di alimentazione, in regime criogenico, è stata misurata e valutata in circa :

$$\left. \frac{\Delta ENR}{\Delta V} \right|_{15V} = \pm 0.1 \text{ dB/Volt} \quad (\text{valido per } V=15 \pm 1V)$$

che è un valore simile a quello che ci si aspetta a temperatura ambiente.

Per un diodo Zener polarizzato con resistore in serie è comunque più significativa la dipendenza dell'ENR dalla corrente di alimentazione, che è stata desunta in:

$$\left. \frac{\Delta ENR}{\Delta I} \right|_{8mA} = \pm 0.1 \text{ dB/mA} \quad (\text{valido per } I=8 \pm 1 \text{ mA})$$

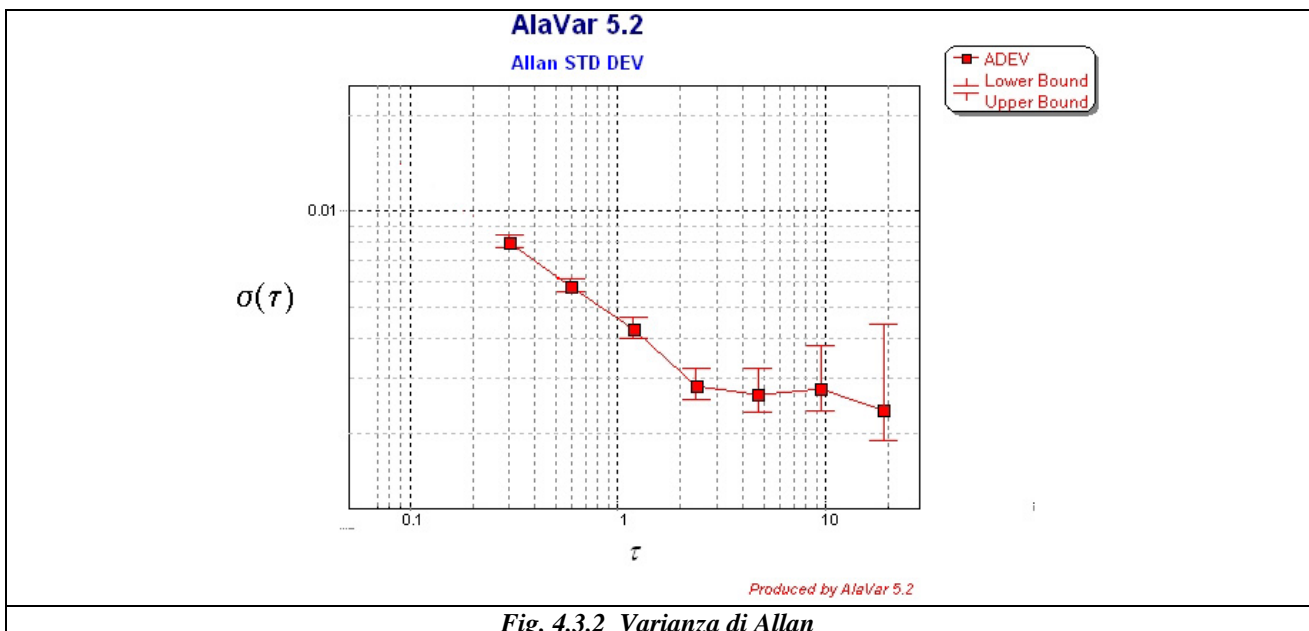
La sensibilità della potenza al variare della temperatura, è stata calcolata dai dati raccolti, mediati in frequenza, per ottenere un unico valore

$$\left. \frac{\Delta ENR}{\Delta T} \right|_{8...22K} = -0.02 \text{ dB/K}$$

$$\left. \frac{\Delta ENR}{\Delta T} \right|_{22...300K} = -0.004 \text{ dB/K}$$

Si è tentato di misurare, seppur sommariamente, lo scostamento dalla distribuzione gaussiana. Per far ciò si è approntata la misura di Varianza di Allan previa raccolta di una quantità di campioni sufficientemente grandi e contigui nel tempo.

A temperatura criogenica stabile (8 K), con l'ausilio del wattmetro *hp* ed un software in *LabView* si sono raccolti automaticamente i dati tramite connessione GP-IB, poi analizzati con il software "Alavar 5.2".



Come si evince dal grafico, la pendenza fino a  $\tau = 2$  sec vale circa -0.5, il che è tipico della distribuzione gaussiana. Si suppone che tale valore sia dominato dal setup di misura. Durante la sessione di misura non è stato possibile condurre analisi più approfondite.

Analisi della *Frequency flatness* : Gli elementi che contribuiscono a generare una colorazione distante dal bianco sono molteplici.

*Frequency flatness*, è l'andamento in frequenza di ENR. Il colore è una nomenclatura riferita all'andamento in frequenza della densità spettrale. In prima approssimazione si può affermare che se ENR è invariante in frequenza allora il colore è bianco.

*Frequency flatness* è una caratteristica che in parte dipende dal solo generatore di rumore ed in parte dipende dalle riflessioni multiple del carico (o attenuatore) sul quale è chiuso. La *frequency flatness* è stata osservata sommariamente, con rivelatore "total power", filtro largo +/- 250 MHz e campionata ogni 2 GHz; il dato è mostrato in fig. 4.3.1 e concentrando l'attenzione non tanto sul livello quanto sulla variazione spettrale.

Poiché l'andamento è molto simile nei due casi: 300K e criogenico, si può affermare che non si notano peggioramenti significativi in criogenia.

## 5. Conclusioni

Sono stati raffreddati criogenicamente prima diodi Zener, poi generatori di rumore allo stato solido basati su diodo Zener.

Si è sperimentato che il diodo funziona a temperature criogeniche sia se polarizzato in diretta sia se polarizzato in inversa alla tensione di *breakdown*. In tali condizioni il semiconduttore genera rumore così come lo genera quando opera a temperatura ambiente.

Il generatore di rumore utilizzato per l'esperimento è stato Noise/Com, mod. NC 5222 la cui fattezze interna è tale da poter funzionare in criogenia senza danni.

Sono stati misurati i valori di polarizzazione DC e l'entità del rumore RF, sia a temperatura ambiente sia in ambiente criogenico. I dati sono stati acquisiti alle temperature significative 300K, 80K, 23K, 8K.

Non sono emerse criticità durante i raffreddamenti.

Si può affermare che:

- I diodi Zener funzionano in criogenia
- I diodi Zener producono rumore anche in criogenia (come a temperatura ambiente)
- Il generatore di rumore marca Noise/com, mod. NC 5222 è raffreddabile senza doverlo modificare.

## 6. Ringraziamenti

Le misure descritte nel presente rapporto non sarebbero state possibile senza l'utilizzo della strumentazione messa a disposizione e condivisa:

- dall'Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Fisica. In particolare la preziosa e disponibile collaborazione ed il confronto con il Dr. Mario Zannoni sono stati fondamentali per la riuscita delle misure.
- da INAF/IASF-BO. In particolare per la fiducia concordata e l'incoraggiamento ricevuto dal Dr. Luca Valenziano.