

LNF-72/4  
17 Gennaio 1972

E. P. Balsamo e G. F. Paternò: POSSIBILE REALIZZAZIONE DI  
STRUMENTAZIONE S. C. CON DISPOSITIVI WEAK-LINK.

LNF-72/4  
17 Gennaio 1972

E. P. Balsamo e G. F. Paternò: POSSIBILE REALIZZAZIONE DI STRUMENTAZIONE S. C. CON DISPOSITIVI WEAK-LINK.

## 1. - INTRODUZIONE -

La scoperta dell'effetto Josephson<sup>(1, 2)</sup>, ha aperto in questi ultimi anni nuove possibilità nel campo della strumentazione a basso rumore, con dispositivi superconduttori<sup>(3)</sup>.

Mediante questi dispositivi è ad esempio possibile misurare campi magnetici inferiori a  $10^{-10}$  Gauss<sup>(4)</sup>, oppure rivelare correnti e tensioni bassissime<sup>(5, 6)</sup>, o rivelare radiazione nel campo delle microonde o del lontano infrarosso<sup>(7)</sup>.

Questo per citare solo alcune delle numerose possibili applicazioni dei dispositivi s. c.

## 2. - CENNI SULL'EFFETTO JOSEPHSON -

L'effetto Josephson è un fenomeno che si verifica in una giunzione tunnel, formata da due metalli superconduttori separati da un sottile strato ( $\sim 10 \text{ \AA}$ ) isolante.

Se una corrente  $I$  si fa circolare nella giunzione, finchè il suo valore è inferiore ad un certo valore  $I_{MAX}$ , essa può circolare senza caduta di tensione, cioè senza dissipazione. Pertanto la giunzione si comporta come un unico pezzo di s. c.

Si parla in tal caso di effetto Josephson in d. c. La  $I_{MAX}$ , dipen

2.

de naturalmente dalla temperatura e dal campo magnetico applicato.

Se la  $I$  supera il valore  $I_{MAX}$ , si stabilisce una d.d.p.  $V$  ai capi della giunzione.

La relazione tra  $I$  e  $V$  è la relazione usuale per il tunnel di quasi particelle (fig. 1) attraverso la barriera.

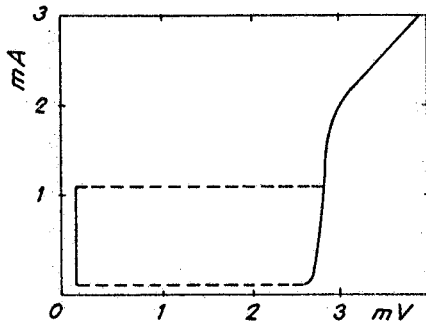


FIG. 1

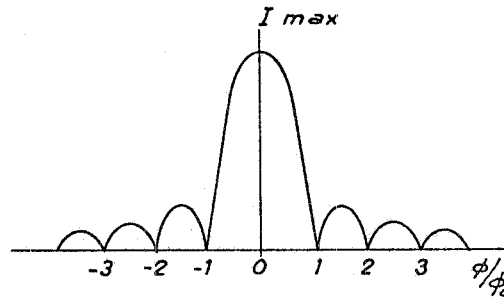


FIG. 2

La densità di corrente in ogni punto della barriera è legata alla differenza tra le fasi delle funzioni d'onda dei due s.c.,  $\varphi$ , dalla semplice espressione:

$$(1) \quad J = J_1 \sin \varphi$$

In presenza di campo magnetico la  $\varphi$  presenta una variazione spaziale sul piano della giunzione. Pertanto la corrente totale  $I_{MAX}$  dipende dal campo magnetico applicato.

Se  $\Phi$  è il flusso del campo magnetico nella giunzione, si ha:

$$I_{MAX} = I_J \left| \frac{\sin \pi \Phi / \Phi_0}{\pi \Phi / \Phi_0} \right|$$

$\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-7}$  Gauss x  $cm^2$  è il quanto di flusso.

Pertanto  $I_{max}$  dipende dal numero di quanti di flusso  $\Phi_0$ , contenuti nella giunzione (fig. 2).

Se ai capi della giunzione si applica una d.d.p.  $V$ , la  $\varphi$  ha una variazione nel tempo regolata dalla equazione:

$$(2) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2eV}{\hbar}$$

ove  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  = costante di Plank,  $e$  = carica dell'elettrone.

Se  $V = \text{costante} = V_0$  si ha dalla (2):

$$\varphi(t) = \frac{2eV_0}{\hbar} t + \varphi_0$$

Dalla (1) si ottiene allora:

$$J(t) = J_1 \sin\left(\frac{2eV_0}{\hbar} t + \varphi_0\right).$$

Si stabilisce nella giunzione una corrente alternata a frequenza  $\omega_0 = (2e/\hbar)V_0$ . Il valore di  $2e/\hbar$  è  $= 483.6 \text{ (MH}_z/\mu\text{V)}$ , la  $\omega_0$  pertanto cade nel range di frequenza delle microonde. Si parla in tal caso di effetto Josephson in a. c.

### 3. - DISPOSITIVI "WEAK LINK". -

In realtà l'effetto Josephson rientra nel quadro fenomenologico più ampio dei dispositivi "weak link", formati da due s. c. debolmente accoppiati, separati cioè da uno strato debolmente s. c.

A causa dell'accoppiamento debole, si stabilisce tra le funzioni d'onda dei due s. c. una differenza di fase. Tale differenza di fase dipende fortemente dal campo magnetico esterno e dalla tensione applicata.

Il comportamento di tali dispositivi salvo poche differenze, è pressochè analogo a quello della giunzione Josephson descritta in precedenza.

In pratica un dispositivo W. L. si può realizzare secondo tre schemi che diremo tipici, nel senso che l'accoppiamento debole viene a dipendere da fenomeni fisici diversi.

Ad una prima classe appartengono:

a) Giunzioni tunnel formate da due film di metallo s. c. separati da un isolante (spessore  $\sim 10 \text{ \AA}$ ).

Queste sono le classiche giunzioni Josephson di cui abbiamo parlato in precedenza.

L'accoppiamento dipende dall'effetto di prossimità tra s. c. e isolante.

b) Giunzioni SNS, formate da due pezzi di metallo s. c. separati da un metallo normale<sup>(8)</sup>. A causa dell'effetto di prossimità il metallo normale si comporta come un s. c. debole.

Una seconda classe è formata da dispositivi del tipo :

4.

"Dayem Bridge"<sup>(9)</sup>. Due pezzi di s.c. di dimensioni macrospiche uniti da una zona sempre di s.c., ma di dimensioni microscopiche, cioè larghezza minore di  $\lambda$  e lunghezza minore di  $\xi$ .

$\lambda$  e  $\xi$  sono la profondità di penetrazione e la lunghezza di coerenza del s.c.

La densità di corrente riduce il parametro d'ordine del s.c., nella zona di piccole dimensioni, che si comporta perciò come un debole s.c.

Ad una terza classe appartengono tutti quei dispositivi, che si possono chiamare ibridi, per i quali non si può dare una descrizione in termini di un unico fenomeno fisico.

Tra questi citiamo il contatto a punta<sup>(10)</sup> e lo S.L.U.G.<sup>(6)</sup> (Superconducting Low Inductance Undulating Galvanometer) (fig. 3).

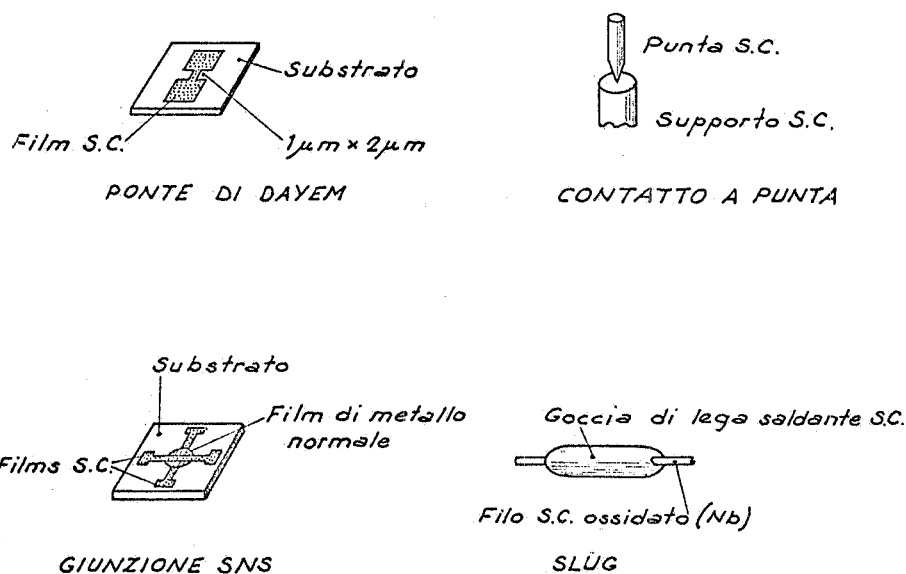


FIG. 3

#### 4. - APPLICAZIONI DEI DISPOSITIVI "WEAK LINK". -

Illustreremo ora alcune tra le applicazioni maggiormente sperimentate dei dispositivi weak link.

Il risultato che si ottiene è in genere uno strumento capace di misurare campi magnetici, tensioni, correnti e radiazioni a microonde e nel lontano infrarosso con estrema sensibilità.

## 4.1. - Il magnetometro. -

È basato sull'interferometro a doppia giunzione (fig. 4a) detto anche S.Q.U.I.D. (Superconducting Quantum Interference Device). Esso è formato da un anello s.c. separato da due "weak link".

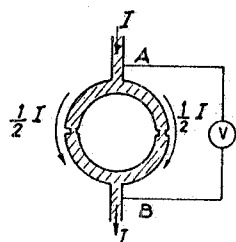


FIG. 4a)

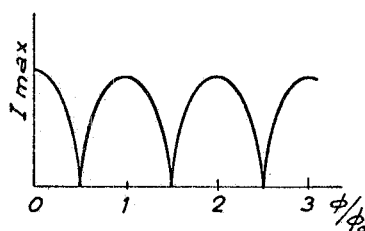


FIG. 4b)

La corrente massima,  $I_{\max}$  che può passare tra i due punti A e B, cioè quella corrente al di sotto della quale non c'è d.d.p. ai capi del dispositivo, dipende dal campo magnetico esterno applicato.

Consideriamo una geometria simmetrica, cioè con due "weak link", con corrente critica uguale e pari a  $i_c$ . Se  $i_c$  è abbastanza piccola, cioè se  $L i_c \ll \Phi_0$ , ove  $L$  è l'induttanza dell'anello,  $\Phi_0$  è il quanto di flusso, ed è pari a  $2.07 \times 10^{-7}$  Gauss  $\times$  cm<sup>2</sup>, la dipendenza di  $I_{\max}$  dal campo è (fig. 4b):

$$I_{\text{MAX}} = 2 i_c \left| \cos \pi \frac{\Phi_a}{\Phi_0} \right|$$

$\Phi_a$  = flusso del campo magnetico esterno, concatenato con l'anello. Pertanto  $I_{\text{MAX}}$  è una funzione periodica con periodo pari al quanto di flusso.

Una variazione di flusso si può misurare contando il numero di oscillazioni che tale flusso produce nella  $I_{\text{MAX}}$ .

Se l'area dell'anello è  $\sim 1$  cm<sup>2</sup> si ha una risoluzione pari a  $2 \times 10^{-7}$  Gauss.

Una misura più fine può essere comunque eseguita apprezzando so lo una frazione del periodo di oscillazione.

4.2. - Galvanometri e voltmetri<sup>(5,6)</sup>. -

Con il magnetometro a SQUID appena descritto si possono misurare anche correnti estremamente piccole, facendole scorrere in un apposito avvolgimento, in genere s.c., e misurando il campo magneti-

co così generato.

A sua volta un siffatto galvanometro può diventare un voltmetro, inserendo una resistenza  $R$  in serie all'avvolgimento di induttanza  $L$ .

La sensibilità del voltmetro, determinata anche dal valore della resistenza  $R$ , è condizionata dalla massima costante di tempo tollerabile nella misura. Valori tipici della sensibilità si aggirano intorno a  $10^{-16}$  Volt per una costante di tempo  $L/R \sim 1$  sec.

#### 4.3. - Rivelatori di radiazione a microonde e onde submillimetriche. -

Quando una giunzione Josephson è irradiata con una radiazione a microonde, di frequenza  $\omega$ , nella caratteristica  $I$ - $V$  si osservano dei gradini (fig. 5a), per valori della tensione dati dalla relazione  $V = n(\omega \hbar / 2e)$ <sup>(11)</sup> ove  $n$  è un intero. Questi gradini sono dovuti alla presenza di battimenti a frequenza zero tra la radiazione esterna e la radiazione Josephson caratteristica della giunzione.

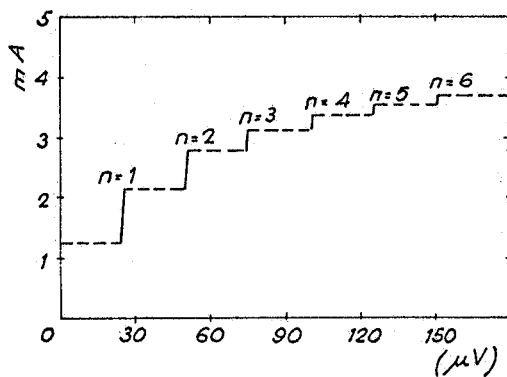


FIG. 5a)

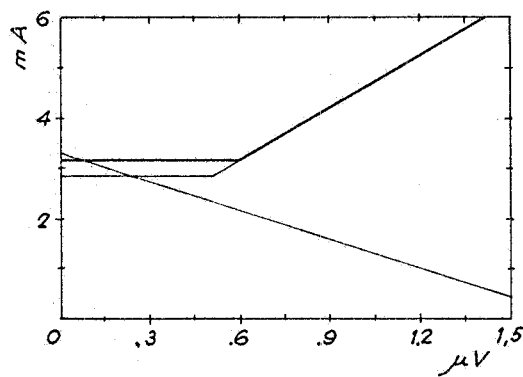


FIG. 5b)

Misurando la distanza tra i gradini si ha una misura della frequenza della radiazione incidente.

Un metodo più sensibile per la rivelazione di microonde si ottiene misurando la variazione della corrente Josephson massima in d.c. in un weak link, con la radiazione applicata. La radiazione incidente sul weak link riduce la sua corrente critica; a causa delle condizioni di polarizzazione quasi a corrente costante questo provoca una variazione nella tensione ai capi del weak link (fig. 5b). Con questa tecnica<sup>(12)</sup> usando un contatto a punta Nb-Nb, è stato possibile rivelare  $5 \times 10^{-13}$  Watt di radiazione a 70 GHz.

Uno dei principali vantaggi di questo tipo di strumentazione s.c., è oltre alla estrema sensibilità, un basso rumore termico dovuto al fatto che essi lavorano a temperature molto basse ( $\sim 1 \div 4$  °K) prossime allo zero assoluto.

Nel caso del voltmetro ad esempio, a causa dell'elemento resistivo, il limite di sensibilità, ottenibile per una accettabile costante di tempo, ( $L/R \sim 1$  sec) coincide con il rumore termico.

Infatti per una  $R \sim 10^{-8} \Omega$  il rumore termico vale circa  $10^{-16}$  Volts per ciclo a  $T \sim 2^\circ K$ .

## 5. - PROPOSTA DI ESPERIENZA. -

Da uno sguardo alla letteratura corrente<sup>(3), (13)</sup>, appare evidente l'esistenza di un interesse specifico, a livello internazionale, nello sviluppo dei dispositivi weak-link per la costruzione di strumentazione a superconduttori.

Presso il Gruppo Magneti Esperienze dei Laboratori Nazionali del CNEN di Frascati si sta attualmente svolgendo un lavoro a livello informativo sui weak-link e loro applicazioni (da diversi anni il MAES sperimenta giunzioni tunnel s.c. preparato con tecniche di evaporazione di metalli sotto vuoto e fabbricazione di filo s.c.).

Si è constatata la possibilità di procedere alla preparazione e sperimentazione di giunzioni Josephson, grazie anche alla già esistente attrezzatura come impianti da vuoto, attrezzature criogeniche etc. ed alle tecniche di rivelazione, sincrona e non, già messe a punto ed utilizzate per altre esperienze.

Un proficuo collegamento a livello di scambio di competenze è in atto con il Laboratorio di Cibernetica del CNR di Arco Felice (Dott. A. Barone), dove sono in sviluppo tecnologie avanzate sulla preparazione di giunzioni Josephson, ma con marcato interesse verso le giunzioni estese che trovano applicazione nel campo della Cibernetica.

Sarebbe nostra intenzione mettere a punto un processo di fabbricazione di dispositivi Josephson, sia del tipo piano che a geometria cilindrica, utilizzando e tecniche di ossidazione tramite il "glow discharge" e films di acidi monocarbonati polimerizzanti organici.

Questi metodi di costruzione di giunzioni sono quelli indicati, allo stato attuale della ricerca, come i più promettenti al fine di ottenere giunzioni stabili e ripetibili<sup>(14)</sup> nel tempo.

Sarebbe auspicabile un parallelo impegno di altri sperimentatori che studino la diretta applicazione dei dispositivi realizzati, in vario tipo di strumentazione, al fine di fornire sia dati ed informazioni più complete sulla possibile utilizzazione degli stessi, sia suggerimenti sulle eventuali modificazioni da apportare alle caratteristiche dei componenti. Un argomento che potrebbe essere proficuamente sviluppato nei Lab. di Frascati è la strumentazione che impiega lo SQUID a Radio-



8.

frequenza come il magnetometro, il nanovoltmetro, etc.

L'impegno finanziario richiesto per la proposta attività può essere riepilogato nelle seguenti voci:

- Testa criogenica completa di pompe, valvole e manostato	3	ML.
- camera schermata per contenere l'area sperim.	1,5	ML.
- impianto di alimentazione in c. c. ad accumulatori	0,6	ML.
- attrezzatura per fotoincisione	2,5	ML.
- campana per deposizione di films sotto vuoto da applicare al banco da ultravacuo già esistente	2,5	ML.
- strumentazione elettronica (amplificatore sincrono, registratore X-Y, termoregolatore del bagno d'He, etc.)	5	ML.
- imprevisti e varie	3	ML.
		<hr/>
	TOTALE	18,1 ML.
		=====

#### BIBLIOGRAFIA -

- (1) - B.D. Josephson, Phys. Letters 1, 251 (1962).
- (2) - P.W. Anderson and J.M. Rowell, Phys. Rev. Letters 10, 230 (1963).
- (3) - B.N. Taylor, Phys. Rev. 39, 2490 (1968).
- (4) - J.M. Goodking and D.L. Stolfa, Rev. Sci. Instr. 41, 799 (1970).
- (5) - J.E. Lukens, R.J. Warburton and W.W. Webb, J. Appl. Phys. 42, 27 (1971).
- (6) - J. Clarke, Phil. Mag. 13, 115 (1966).
- (7) - C.C. Grimes, P.L. Richards and S. Shapiro, J. Appl. Phys. 39, 3905 (1968).
- (8) - J. Clarke, Proc. Roy. Soc. A 308, 447 (1969).
- (9) - P.W. Anderson and A.H. Dayem, Phys. Rev. Letters 13, 195 (1964).
- (10) - J.E. Zimmerman and A.H. Silver, Phys. Rev. 141, 367 (1966).
- (11) - S. Shapiro, Phys. Rev. Letters 11, 80 (1963).
- (12) - C.C. Grimes, P.L. Richards and S. Shapiro, Phys. Rev. Letters 17, 431 (1966).
- (13) - O. Doyle, Electronics 38 (1971); J. Clarke, Phys. Today 30 (1971); Conferenze su "Superconducting devices" Charlottesville

- (1967); Austin (1968), Gathinburg (1969), Boulder (1970), J. Appl. Phys. 42, 27 (1971); 42, 163 (1971); M. Cerdonio "Tavola rotonda" sulle applicazioni della Superconduttività Frascati (1971), Rapporto LNF-71/25 (1971), pag. 17.
- (14) - W. Schroen, J. Appl. Phys. 39, 2671 (1968).