

# MATERIALS SUPERCONDUCTORS EN DISPOSITIUS DE MICROONES

JULI JURADO

Institut de Ciència de Materials de Barcelona (CSIC)  
Campus Universitat Autònoma de Barcelona  
08193 Bellaterra (Barcelona)

## 1. SUPERCONDUCTIVITAT

La superconductivitat és el nom que es dona a una combinació de propietats elèctriques i magnètiques, que apareixen en alguns materials, generalment metalls, per sota de certa temperatura. Aquestes propietats són:

### a) *Conductor perfecte*

La resistència elèctrica dels metalls disminueix quan els refredem. Aquesta resistència, bàsicament, la podem atribuir a dos efectes; primer, les oscil·lacions dels àtoms provoquen la dispersió dels electrons de conducció i donen una resistència elèctrica al material; a més, els possibles defectes cristal·lins del material, que trenquen la seva perfecta periodicitat, també dispersaran els electrons. Per a un metall pur la resistència elèctrica és nul·la a temperatura de 0 K.

En canvi, el superconductor es torna conductor perfecte a una temperatura no nul·la,  $T_C$ , anomenada temperatura crítica (vegeu la figura 1). Per als metalls i aleacions clàssiques, la temperatura crítica màxima és de 23 K ( $Nb_3Ge$ ) i no fou fins al 1986 quan Bednorz i Muller descobriren un òxid de coure, lantà i estronci amb  $T_C$  entorn de 40 K. Poc després, P. Chu descobria un òxid de coure, itri i bari amb  $T_C$  entorn de 93 K, descobriment important ja que aquesta temperatura és superior al punt d'ebullició del nitrogen (77 K), que és un líquid refrigerant de baix cost.

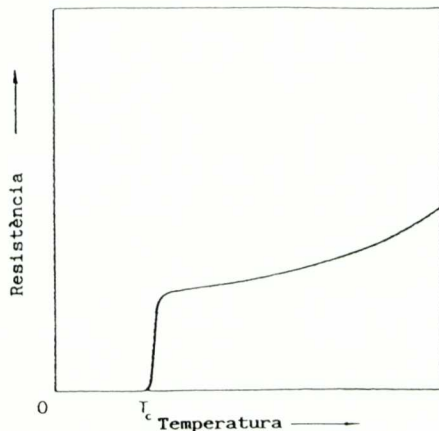


Fig. 1 Variació de la resistència elèctrica respecte a la temperatura per a un superconductor.

### *b) Diamagnet perfecte*

En un conductor perfecte, atès que no té resistència elèctrica, no hi pot haver cap diferència de potencial, i, per tant, tenint en compte la llei de Lenz,

$$\epsilon = - d\Phi/dt,$$

el flux magnètic en el seu interior haurà d'ésser constant. En canvi, un superconductor per sota de la temperatura crítica és un diamagnet perfecte, és a dir, en presència d'un camp magnètic, les línies de camp no poden penetrar i són expulsades del seu interior (inducció magnètica  $B = 0$ ). Aquest fenomen s'anomena efecte Meissner (vegeu la figura 2).

## 2. SUPERCONDUCTORS TIPUS I I II

Els materials superconductors es poden classificar en dos grups segons la resposta a un camp magnètic extern. En un superconductor de tipus I, per a camps més petits que un cert camp crític  $H_C$  (o inducció crítica  $B_C$ ), el camp és expulsat del seu interior (efecte Meissner), i per a camps superiors a  $H_C$  el camp penetra uniformement i el material passa a l'estat normal amb resistència no nul·la.

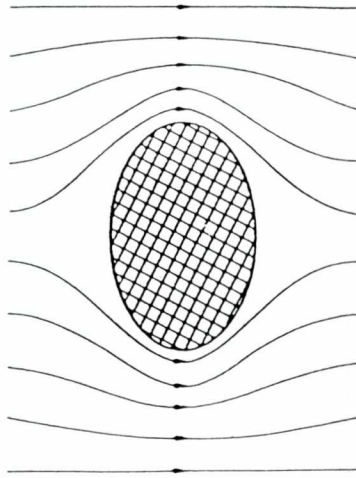


Fig. 2. Distribució de les línies de flux en un material superconductor.

En canvi, en un superconductor de tipus II aquesta transició vers l'estat normal és molt més gradual. Per a camps més petits que un cert camp crític inferior  $H_{C1}$  ( $B_{C1}$ ) el material expulsa el flux del seu interior (zona Meissner), però entre aquest camp i un camp crític superior  $H_{C2}$  ( $B_{C2}$ ) el flux entra quantitzadament, en forma de tubs de flux (estat mixta). Per a camps superiors a  $H_{C2}$  el flux entra uniformement al material i aquest assoleix la seva resistència de l'estat normal.

Aquests camps crítics depenen de la temperatura a què es troba el material, i tots són zero quan el material està a la temperatura crítica. Aquest resultat es pot reflectir en uns diagrames de fases que s'observen a la figura 3. Cal assenyalar que els superconductors tipus I presenten un camp crític màxim al voltant dels 0.06 T,

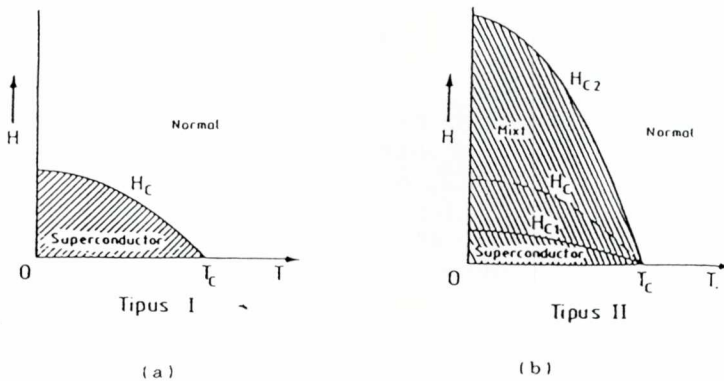


Fig. 3. a) Diagrama de fases per a un superconductor de tipus I. b) Diagrama de fases per a un superconductor de tipus II.

mentre que un altre de tipus II presenta un camp crític superior de centenars de tesles, és a dir, quatre ordres de magnitud superior, per tant, a l'hora de fer aplicacions s'utilitzaran els superconductors de tipus II.

### 3. CORRENT CRÍTIC

#### a) *Corrent crític*

Un material superconductor presentarà una resistència nul·la sempre que el corrent que hi circuli sigui més petit que un cert corrent crític  $I_C$ . Suposem que tenim un cilindre superconductor de tipus I pel qual circula un corrent  $I$ , aleshores aquest originarà un camp en la seva superfície que satisfà la relació  $I = 2\pi a H$ , on  $a$  és el radi del cilindre, així, el corrent crític serà aquell que generi en la superfície del material un camp igual al camp crític:

$$I_C = 2\pi a H_C$$

En un superconductor de tipus II, a l'estat mixte el flux entra en el material quantitzadament, i aquests tubs de flux es dissiparan només si es mouen.

Degut als defectes de la xarxa, els tubs de flux es poden quedar ancorats amb una força d'ancoratge  $f_p$ , i aquests es mouran si la força de Lorentz  $\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$  supera aquesta força d'ancoratge. Així, en els superconductors de tipus II trobarem uns corrents crítics més elevats si la quantitat de defectes i la seva concentració és suficientment elevada.

#### b) *Unions Josephson*

Un fenomen interessant s'esdevé quan tenim dos superconductors separats per una barrera no superconductora (metàl·lica o aïllant), aquest és l'efecte Josephson. L'efecte Josephson consisteix en el pas de portadors de càrrega per efecte túnel a través de la barrera, sense dissipació d'energia. Aquest efecte, d'altra banda, posa en evidència que, en l'estat superconductor, els portadors de càrrega tenen una càrrega doble a la de l'electró, és a dir, la conducció té lloc per parells d'electrons anomenats parells de Cooper.

Els parells de Cooper de cada superconductor van descrits per una funció d'ona que tindrà una fase diferent en cadascun d'ells (figura 4a). El corrent superconductor que pot circular per la unió va donat per:

$$I_s = I_C \sin (\varphi_1 - \varphi_2)$$

on  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  són les fases de la funció d'ona en ambdós superconductors i  $I_C$  el corrent crític de la unió.

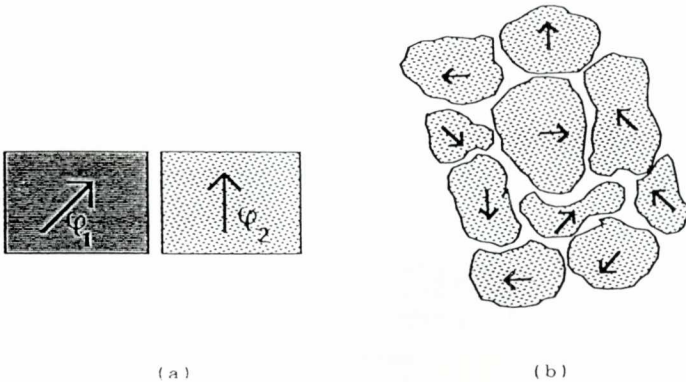


Fig. 4. a) Unió Josephson. b) Sistema granular.

Per a poder establir aquest corrent superconductor cal que les fases de les funcions d'ona en els dos superconductors no variïn aleatòriament, i per tant caldrà una energia d'acoblament entre tots dos, que va donada per:

$$E = h/2e I_C \cos (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Observem que per a  $I_s = I_C$  obtenim que  $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$  i per tant l'energia d'enllaç és nul·la. També es troba que el corrent crític de la unió és inversament proporcional a la seva resistència i, per tant, si els dos superconductors estan molt separats no circularà un corrent superconductor apreciable per la unió.

Finalment cal dir que la tensió que apareix sobre la unió és determinada per la variació temporal de les diferències de fase:

$$2 e V = h d(\varphi_1 - \varphi_2)/dt;$$

així, si fem incidir una radiació electromagnètica sobre la unió, de manera que la diferència de fase oscil·li a la freqüència de la radiació, sobre la unió mesurarem una tensió que dependrà de la freqüència de la radiació (efecte Josephson AC).



c) *Sistema granular*

Un sistema granular (figura 4b) el podem entendre com una col·lecció d'unions Josephson, algunes en sèrie i d'altres en paral·lel, i per tant aquest respondrà davant la irradiació amb ones electromagnètiques. Així, doncs, un sistema granular el podem utilitzar com a sensor de microones.

Per a entendre millor el comportament d'un sistema granular, observem la figura 5a, on es representa la resistivitat d'un superconductor sense camp magnètic i sota camp magnètic; observem que la primera baixada de resistivitat (comuna a totes dues corbes) és deguda al fet que cadascun dels grans es torna superconductor, i a una certa temperatura se separen perquè el camp magnètic desacobla les unions entre els grans. També podem observar aquest efecte a la figura 5b, on comparem la susceptibilitat AC d'un superconductor mesurat en

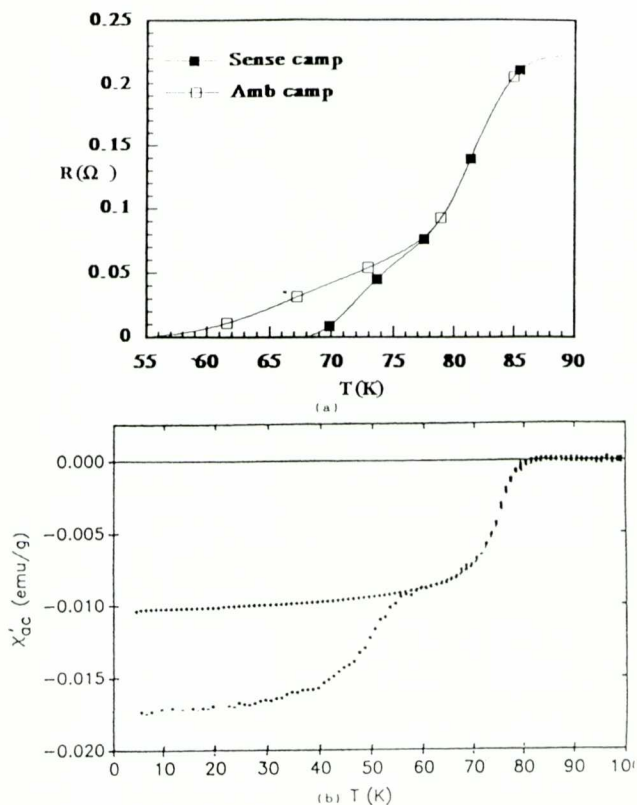


Fig. 5. a) Resistència respecte a temperatura d'un superconductor sense i amb camp aplicat. b) Susceptibilitat AC d'un superconductor en pols i en pastilla.

forma de pols (corbe superior) o en forma de pastilla ceràmica (corbe inferior). La segona baixada de la susceptibilitat de la pastilla és deguda a la connectivitat dels grans, es a dir quan els corrents d'apantallament poden circular de gra a gra.

#### d) Resistivitat AC

El fet que un superconductor no presenta resistència elèctrica és estrictament cert per a corrent continu; si el corrent és altern els electrons que circulin pel material dissiparan energia.

Per a entendre aquest fet cal dir que en un superconductor, per sota de la temperatura crítica, els electrons de conducció els podem dividir en dues classes: electrons normals i superelectrons. Aquest és el model dels dos fluids. Així, per sota  $T_c$  i en corrent continu, el transport del corrent el realitzen els superelectrons i la resistència del material és nul·la. Podem considerar el material com dos conductors en paral·lel de manera que a corrent constant tota la intensitat passa pel superconductor.

Si pel material circula un corrent altern, per a freqüències suficientment elevades el fluid superconductor, per a la seva inducció, tindrà una impedància comparable amb el fluid normal i per tant en el nostre material apareixerà una dissipació energètica.

És a dir, si sobre un superconductor incideix una radiació electromagnètica d'elevada freqüència, el material presentarà una resistència no nul·la.

#### 4. DETECTOR DE MICROONES

Com a exemple d'aplicació d'un sistema granular podem considerar el dispositiu de la figura 6; sobre un material granular superconductor en capa

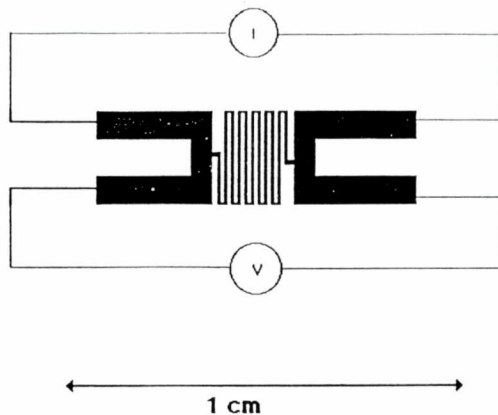
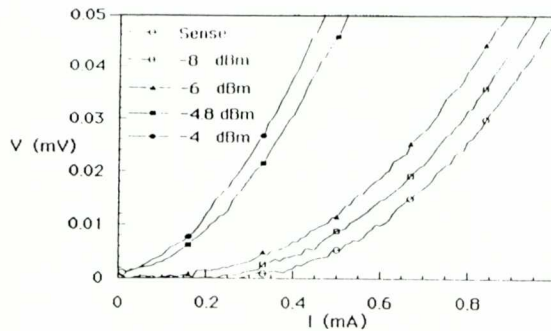


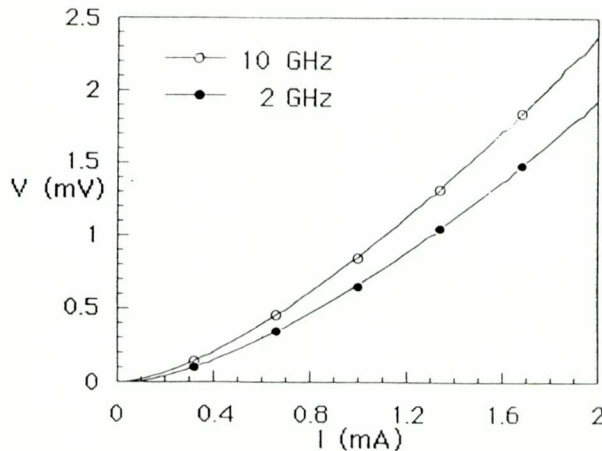
Fig. 6. Dispositiu experimental per al detector de microones.

prima, fotolitografiem la màscara de la figura 6 per a tenir una major resolució en tensió. L'experiència consisteix en mesurar les característiques  $V(I)$  del material sota la irradiació de microones.

A la figura 7a observem com varia la tensió que mesurem en el dispositiu (a 77 K), per a cada corrent i a una freqüència de 3.47 GHz, en funció de la potència de la radiació. En aquesta figura s'observa que sense radiació el material presenta un corrent crític de 0.275 mA aproximadament.



(a)



(b)

Fig. 7. a) Característiques  $V(I)$  sota radiació de microones en funció de la potència. b) Característiques  $V(I)$  sota radiació de microones en funció de la freqüència.

Quan s'irradia la mostra amb una potència de  $-8$  dBm s'observa que el corrent crític disminueix a 0.2 mA, perquè la radiació electromagnètica desacobla la connexió entre alguns grans de la mostra. El fet que algunes unions estiguin ara desacoblaes fa augmentar la tensió que mesurem per a cada corrent.



En anar augmentant la potència de la radiació, el corrent crític del material va disminuint fins que a una potència de  $-4.8$  dBm aproximadament el corrent crític es fa zero. Així, doncs, a potències properes a  $-4.8$  dBm és on el dispositiu serà més sensible, ja que a prop d'aquestes potències es passa de tenir un camí superconductor a no tenir-lo, mentre que a potències més petites es passa de tenir molts camins superconductors a tenir-ne menys. Aquest fet es posa de manifest a la figura 7a, ja que la diferència relativa de tensió entre les corbes de  $-4.8$  i  $-6$  dBm és més gran que entre  $-6$  i  $-8$  dBm.

A la figura 7b observem com influeix la freqüència en la mesura de la característica  $V(I)$ . Com ja hem comentat, cal esperar a major freqüència major tensió mesurada però la predicció teòrica no és senzilla pel múltiple nombre d'unions involucrades, tant en sèrie com en paral·lel, i no totes elles idèntiques, és a dir, cadascuna té un corrent crític diferent.

## 5. DISPOSITIUS PASSIUS DE MICROONES AMB SUPERDUCTORS

En general, totes les aplicacions de la superconductivitat a dispositius passius de microones es basen en el fet que la resistència superficial d'un superconductor irradiat per microones és un o més ordres de magnitud inferior a la del coure altament pur i gens oxidat. Aquesta resistència superficial és deguda a la resistivitat AC que apareix a alta freqüència. A la figura 8 es comparen les resistències superficials d'un coure d'alta puresa amb la d'un compost de tali, superconductor d'alta temperatura, irradiats per microones de 10 GHz.

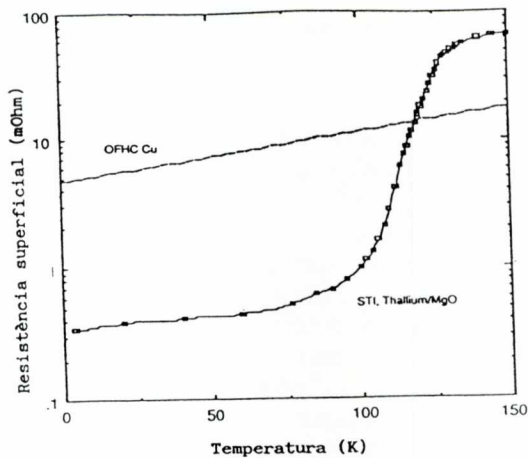


Fig. 8. Resistència superficial respecte a temperatura per a un superconductor de tali i per a coure molt pur i d'alta qualitat (OFHC Cu).

### a) Ressonador

Els ressonadors s'utilitzen en molts tipus de dispositius de microones. A la figura 9a s'observa l'estructura d'un ressonador en forma d'anell de freqüència fonamental 3.4 GHz. Aquest es pot utilitzar en la realimentació d'un oscil·lador (figura 9b). El ressonador rep radiació d'un ampli ventall de freqüències a causa del moviment tèrmic aleatori dels electrons, però aquest sols ressonarà a la freqüència a què està sintonitzat i, a més, l'amplificador amplificarà el senyal d'aquesta freqüència i obtindrà un senyal bastant monocromàtic.

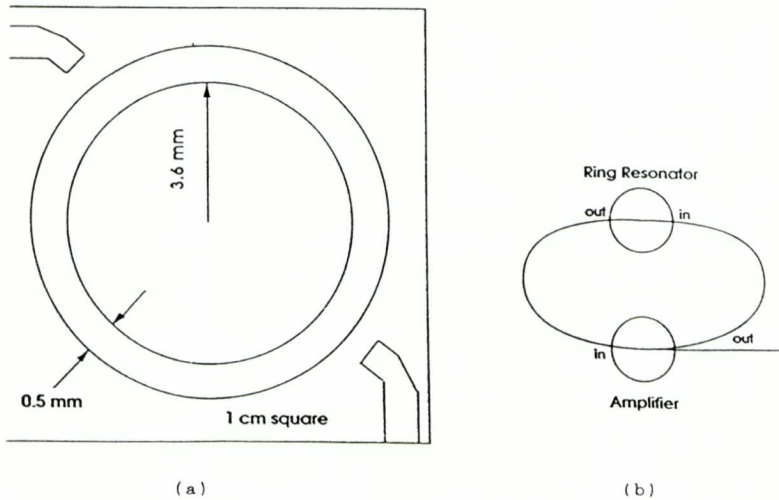


Fig. 9. a) Ressonador d'anell de freqüència fonamental 3.4 GHz. b) Realimentació amb oscil·lador.

Per a qualificar el ressonador utilitzarem el factor de qualitat  $Q$ , que és el quocient entre la freqüència de ressonància i l'amplada de banda, relació que es voldrà maximitzar. A la figura 10 s'observa el factor de qualitat en funció de la freqüència per a quatre ressonadors. Tres factors limiten el factor de qualitat: les pèrdues degudes a la resistència elèctrica, les pèrdues degudes a l'escalfament del dielèctric utilitzat com a substracte i les pèrdues de la radiació en la seva propagació.

Així, si substituïm el coure per un superconductor, les pèrdues elèctriques es minimitzen, ja que, com s'ha vist, la resistència superficial del superconductor és molt menor. Cal remarcar que el pendent negatiu en funció de la freqüència per a un material superconductor és degut al fet que la seva resistència superficial augmenta molt amb la freqüència i, com que la potència dissipada és proporcional a la resistència del material i a la freqüència d'irradiació, les pèrdues en el superconductor augmenten fortament amb la freqüència.

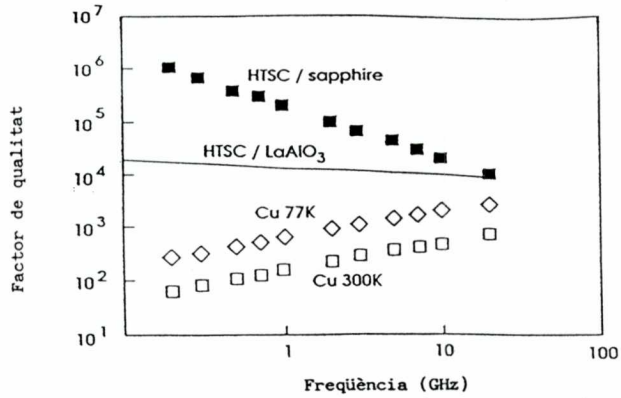


Fig. 10. Factor de qualitat respecte a la freqüència per a diversos ressonadors.

Amb els superconductors s'obtidran ressonadors d'alt factor de qualitat, és a dir, de baix soroll i, per a les comunicacions, una oscil·lació de baix soroll ens permet de transmetre més informació.

*b) Filtre passa-banda*

Un filtre passa-banda ideal ha d'acceptar un rang de freqüències determinat i tallar, el més abruptament possible, les restants. A la figura 11a s'observa

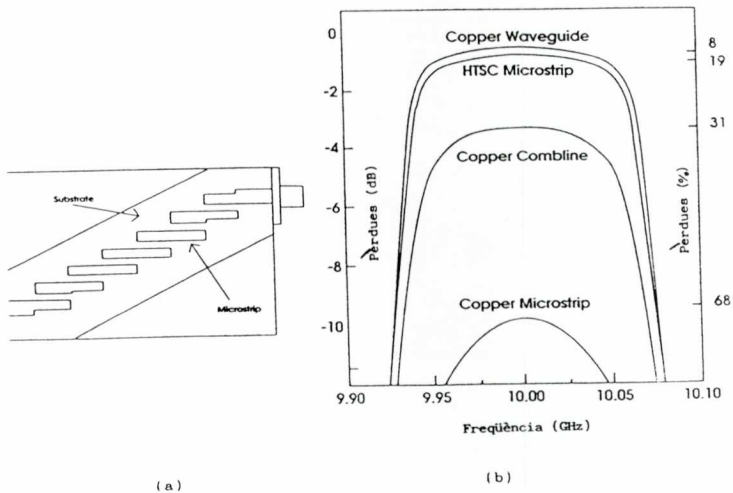


Fig. 11. a) Estructura comuna d'un filtre passa banda. b) Pèrdues respecte a la freqüència per a diversos filtres.

l'estructura comuna d'un filtre passa-banda. És una sèrie de ressonadors posats en línia que seleccionen cadascuna de les freqüències de la banda.

A la figura 11b es comparen quatre filtres passa-banda. Observem que el filtre de microlínies fet amb superconductor té unes característiques molt millors que l'anàleg de coure. De fet, el filtre de microlínies de superconductor té una resposta similar a la d'una guia d'ones de coure. L'avantatge principal d'utilitzar el superconductor i no la guia d'ones és que aquest és el 90% més petit i més lleuger que la guia. A més, la guia d'ones és un dispositiu molt car comparat amb el filtre superconductor.

### c) Línies de retard

En les aplicacions de microones cal a vegades retardar un senyal un cert temps, de l'ordre de 100 ns o 1  $\mu$ s. És en aquestes aplicacions que s'utilitzen les línies de retard, que són només un circuit per a guiar les ones i que les obliga a recórrer una certa distància. Atès que aquest circuit és resistiu, al llarg de la línia de retard hi haurà pèrdues, que es podran minimitzar utilitzant una línia superconductora.

En la figura 12 observem les pèrdues en una línia de 100 ns en funció de la freqüència. Observem que la utilització de superconductors minimitza les pèrdues, però a alta freqüència les pèrdues es poden fer comparables a les del coure. Aquí es torna a fer visible la influència del substrate: un substrate de safir dona menys perdua que un altre de  $\text{LaAlO}_3$ , a causa de les seves propietats dielèctriques.

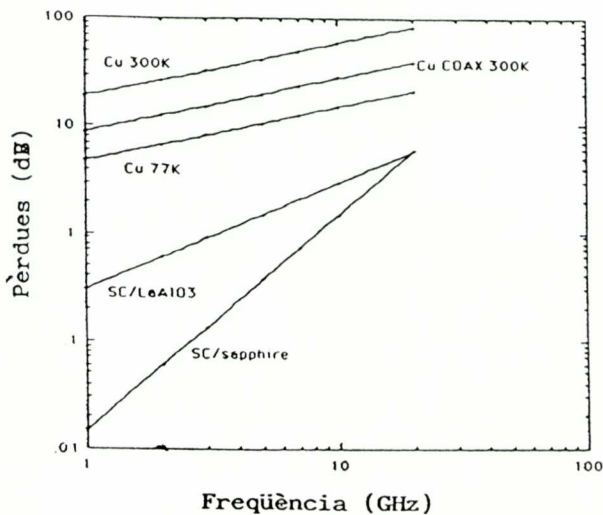


Fig. 12. Pèrdues respecte a la freqüència en una línia de retard de 100 ns.

**AGRAÏMENTS**

Agraïm la col·laboració del Dr. Àngel Cardama (Departament de Teoria del Senyal, UPC), sense el suport del qual no es podrien haver realitzat les mesures presentades al quart punt. També agraïm la col·laboració del Laboratori de Capes Primes (Facultat de Física, Universitat de Barcelona) per les capes primes superconductores amb què s'ha realitzat el treball.