

**UNIVERSITA' DEGLI
STUDI DI PADOVA**
Facoltà di Ingegneria
Facoltà di Scienze MM. FF. NN.

**ISTITUTO NAZIONALE DI
FISICA NUCLEARE**
Laboratori Nazionali di Legnaro

Con la Federazione Regionale degli Industriali Veneti

Tesi di MASTER in
**“Trattamenti di Superficie Applicati a Tecnologie
Meccaniche Innovative per l’Industria”**

**REALIZZAZIONE DI UNA CAVITÀ
ACCELERATRICE SUPERCONDUTTIVA
A BANDA FOTONICA**

Relatore: prof. V. Palmieri

Candidato: **dott. Diego Tonini**
N° Matr.: **887845-CM**

Anno Accademico 2003/04

Sommario

Sommario	III
Introduzione	V
Capitolo 1 Teoria e applicazioni delle strutture a banda fotonica.....	3
Strutture a banda fotonica (Photonic Band Gap – PBG)	3
Modi di difetto	6
Cavità risonanti e PBG.....	6
Rappresentazione matematica delle strutture a banda fotonica	11
Capitolo 2 Progettazione e realizzazione delle cavità.....	15
Approccio costruttivo.....	15
Progetto	17
Realizzazione	21
Capitolo 3 Trattamenti di superficie	23
Finitura superficiale di una cavità acceleratrice.....	23
Finitura meccanica	23
Pulizia con solventi	24
Sgrassaggio ad ultrasuoni	25
Trattamenti chimici	26
Capitolo 4 Apparatî da vuoto e criogenici	31
Criostato	31
Progetto del sistema di tenuta e raffreddamento della cavità.....	32
Capitolo 5 Misure in Radiofrequenza	39
Principi per la misura di una cavità risonante	39
Sistema di misura RF	42
Scopo delle misure	43
Accoppiamento delle antenne alla cavità PBG	43
Misura della frequenza di risonanza	47
Misura del Q a caldo	50
<i>Tuning</i> della cavità	50
Conclusioni	55
Bibliografia	57

Introduzione

La tecnologia degli acceleratori di particelle è tradizionalmente un serbatoio da cui attingere per il trasferimento di conoscenze tecniche dall'ambito della ricerca di base all'industria; in questo campo i *Laboratori Nazionali de Legnaro* dell'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* (LNL – INFN) vantano una lunga esperienza come ente di ricerca di alto livello sia in ambito italiano che internazionale, nello sviluppo di nuove tecniche di accelerazione e nell'applicazione di conoscenze e metodologie tipiche della scienza dei materiali al campo degli acceleratori di particelle. Il master in *Trattamenti di superficie applicati a tecnologie meccaniche innovative per l'industria* si inserisce in questo contesto e funge da ponte per il trasferimento del bagaglio di conoscenze maturate durante gli anni per il trattamento dei materiali delle cavità acceleratrici a realtà industriali presenti sul territorio nazionale.

Il trattamento superficiale di una cavità acceleratrice superconduttiva è un passaggio fondamentale nella sua realizzazione, in quanto predispone lo strato superficiale del risonatore stesso a sostenere le condizioni di vuoto, temperatura ed alti campi elettrici presenti durante il funzionamento nell'acceleratore; questi trattamenti presuppongono un'approfondita conoscenza della scienza dei materiali ed una robusta preparazione di tipo applicativo oltre che teorico.

Il lavoro di questa tesi prende l'avvio da due istanze fondamentali, cioè dall'applicazione delle conoscenze fisiche, chimiche e meccaniche apprese nel corso del master e dalla tradizione nello sviluppo di nuove tecniche di accelerazione dei Laboratori Nazionali di Legnaro con il fine di realizzare e caratterizzare un nuovo tipo di strutture acceleranti basate sul concetto di *crystallo fotonico* o *photonic band gap* (PBG) applicato alle microonde.

Durante questo lavoro si sono quindi realizzati alcuni prototipi di cavità PBG risonanti a 14 e 6 GHz, in rame ed in niobio superconduttivo, sviluppando un metodo realizzativo che permettesse di evitare il ricorso a costose saldature *electron beam*; le cavità così realizzate sono state trattate superficialmente adattando il protocollo di trattamento utilizzato per altre cavità costruite nei Laboratori e studiando nuove strade tecniche per la loro finitura superficiale. Infine si è proceduto ad adattare i sistemi criogenici e RF integrandoli per caratterizzare le cavità costruite.

Introduzione

Questo progetto si inserisce in una collaborazione fra i Laboratori Nazionali di Legnaro e la sezione INFN di Napoli, che ha fornito il supporto teorico sulla teoria dei cristalli fotonici applicati agli acceleratori e ha contribuito al progetto delle cavità attraverso le simulazioni dei campi elettromagnetici in cavità; il gruppo di legnaro si è occupato, oltre che della costruzione, dei trattamenti di superficie e delle misure, anche della parte riguardante la superconduttività in Radiofrequenza.

La scansione in capitoli di questa tesi segue essenzialmente la scansione concettuale del lavoro svolto:

Il **Capitolo 1** accenna alla teoria dei cristalli fotonici ed alla sua applicazione per realizzare strutture risonanti che operano nel campo delle microonde e possono essere utilizzate nella costruzione di cavità acceleratrici superconduttive.

Il **Capitolo 2** descrive il progetto e la realizzazione pratica delle cavità a 14 e 6 GHz

Il **Capitolo 3** passa in rassegna i trattamenti di superficie applicati alle cavità, evidenziandone lo scopo e gli effetti sulle prestazioni in RF del risonatore.

Nel **Capitolo 4** è brevemente descritto il criostato utilizzato per le misure ed è mostrato il progetto per la tenuta ed il raffreddamento della cavità.

Il **Capitolo 5**, infine descrive i principi di misura in radiofrequenza di una cavità e presenta i risultati ottenuti per le PBG a 6 GHz.

Capitolo 1

Teoria e applicazioni delle strutture a banda fotonica

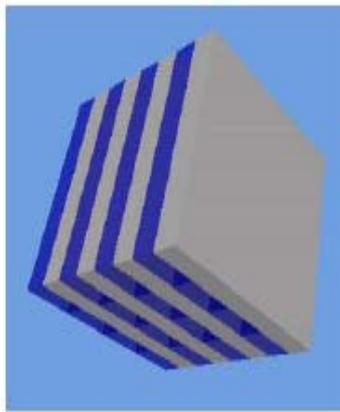
In questo capitolo viene accennata la teoria alla base dei cristalli fotonici con particolare attenzione alle strutture operanti nelle microonde e vengono descritte le applicazioni di tali strutture come cavità risonanti per acceleratori di particelle di concezione innovativa.

Strutture a banda fotonica (Photonic Band Gap – PBG)

Un cristallo fotonico (Photonic Crystal – PC) è una struttura periodica artificiale costruita in modo da influire sulle proprietà dei fotoni analogamente a quanto il reticolo cristallino di un qualsiasi materiale agisce sulle proprietà degli elettroni. In un cristallo semiconduttore il reticolo cristallino periodico genera un potenziale elettrico tale da generare la formazione di un gap energetico per gli elettroni, ossia un intervallo di energie precluso al moto degli elettroni; nel caso di un cristallo fotonico queste condizioni vengono riprodotte per i fotoni attraverso una variazione periodica della costante dielettrica (e quindi dell'indice di rifrazione $n = \sqrt{\varepsilon}$) realizzata in modo da simulare il reticolo di un cristallo ordinario. Se le costanti dielettriche dei materiali sono sufficientemente diverse, lo scattering alla Bragg dalle interfacce dei materiali può riprodurre per i fotoni molti dei fenomeni dovuti ai potenziali atomici di cui risentono gli elettroni, tra cui la formazione di una regione di frequenze in cui la propagazione della luce è impedita, ossia la formazione di un gap di banda fotonico (Photonic Band Gap – PBG).

Si definisce **dimensione** della struttura PBG il numero di direzioni in cui la costante dielettrica varia periodicamente, e pertanto è possibile avere¹:

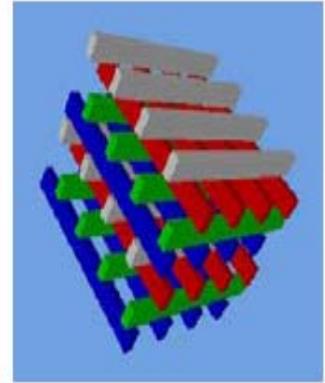
1. PBG monodimensionali: per esempio una guida d'onda formata dall'alternarsi di piani di dielettrico spazati periodicamente lungo la sua lunghezza;
2. PBG bidimensionali: come un reticolo di barre dielettriche parallele;
3. PBG tridimensionali: ad esempio un reticolo di tipo diamante.



1-D BPBG



2-D BPBG



3-D BPBG

Figura 1: strutture photonic band gap ad 1, 2, 3 dimensioni.

La dimensione del reticolo fotonico gioca un ruolo importante nel determinare i modi caratteristici di un risonatore di tipo PBG.

Se esiste una regione di frequenze per cui la propagazione del campo è impedita per ogni direzione di propagazione, allora la struttura possiede *una band gap completa*; in generale esiste una band gap per ogni direzione in cui c'è una modulazione periodica della costante dielettrica. Nei PC monodimensionali qualche band gap completa è garantita per qualsiasi periodicità della costante dielettrica, mentre per dimensioni superiori l'esistenza della band gap completa dipende dal tipo di reticolo, dal rapporto fra le aree a bassa ed alta costante dielettrica, dalla differenza fra le costanti dielettriche e dalla struttura di scattering.

In analogia con i semiconduttori si può tracciare un diagramma a bande anche per le strutture PBG, la banda corrispondente ai valori di ω per i quali l'onda è concentrata maggiormente nel mezzo ad alto indice di rifrazione è denominata *banda dielettrica* (e corrisponde alla banda di valenza nei semiconduttori) mentre viceversa l'altra è detta *banda d'aria* (e corrisponde alla banda di conduzione)². La ω nella banda dielettrica è minore che in quella d'aria per cui le onde che si propagano nell'una o nell'altra banda vengono dette onde lente e veloci, rispettivamente.

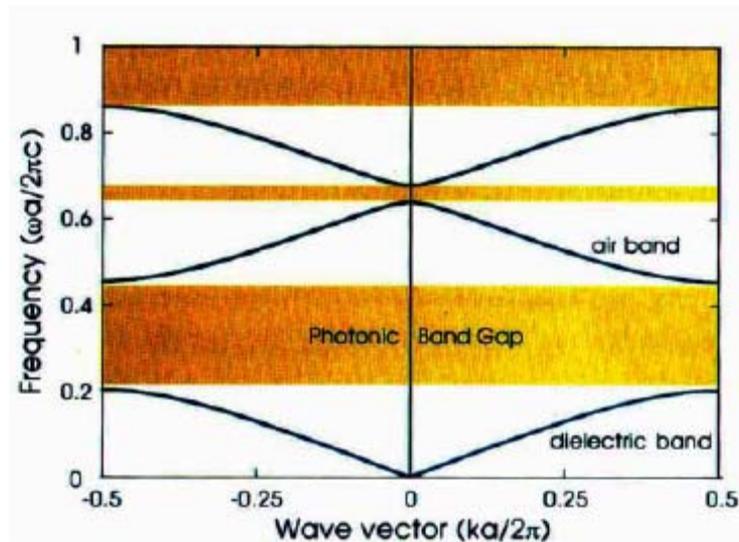


Figura 2: struttura a bande di un cristallo fotonico.

Si può notare che:

- all'aumentare del numero di strati che formano il reticolo la band gap diventa più netta,
- la band gap dipende dal rapporto fra le ϵ delle colonne e del mezzo circostante,
- fissato il periodo della struttura, aumentando la frazione di materiale a bassa ϵ aumenta la band gap.

Strutture a banda fotonica possono essere realizzate costruendo un reticolo di cilindretti ad alta costante dielettrica circondati dal vuoto oppure in maniera inversa, con un mezzo ad alta costante in cui è presente un reticolo di fori; in generale in una struttura periodica:

- regioni non connesse di materiale ad alto indice di rifrazione favoriscono la determinazione della band gap per i modi TM, cioè impediscono la propagazione di modi in cui il campo magnetico è trasversale;
- regioni connesse di materiale ad alto indice di rifrazione favoriscono invece la formazione di band gap per i modi TE;
- se sono presenti entrambe le caratteristiche si produrrà una band gap completa per entrambe le polarizzazioni.

Le considerazioni fin qui fatte valgono per un reticolo infinito, nel caso di un sistema reale, con un numero finito di colonne, non ci sarà una regione di frequenze assolutamente vietate ma i modi all'interno del gap avranno una decadenza esponenziale lungo una direzione; variando la frequenza di un'onda incidente ci saranno regioni di trasmittanza quasi perfetta separate da regioni di forte attenuazione che corrispondono al gap. Perché si possa approssimare la struttura come un reticolo infinito occorre che la lunghezza del

reticolo sia numerose volte maggiore della più grande lunghezza di attenuazione nel reticolo stesso.

Modi di difetto

Introducendo delle irregolarità nella struttura del cristallo fotonico (*difetti*), cioè perturbando la periodicità, si possono creare degli stati fotonici localizzati all'interno della banda di frequenze proibita, proprio come un atomo di drogante crea stati elettronici permessi all'interno del band gap in un cristallo di semiconduttore. In ulteriore analogia con la fisica dello stato solido, i modi risonanti dovuti a questa rottura della periodicità sono detti *modi di difetto* ed un cristallo fotonico in cui sono stati introdotti dei difetti è detto *drogato*.

Nelle strutture PBG 2D un difetto è ottenibile eliminando una colonna del reticolo o sostituendola con un materiale a diversa costante dielettrica; la presenza del difetto si presenta come un picco di trasmissività all'interno del gap e produce una concentrazione del campo attorno a sé ed un suo decadimento esponenziale all'esterno del difetto, poiché il modo permesso è all'interno della regione proibita e quindi non può esserci campo all'esterno della regione difettuale.

La rimozione di una sola colonnina crea un difetto localizzato e fa agire la struttura come una cavità risonante il cui modo eccitato è quello del difetto stesso, la rimozione di una serie di colonne crea invece difetti di linea che determinano una guida d'onda a perdite molto basse.

Cavità risonanti e PBG

Una cavità risonante è una regione di spazio racchiusa da una superficie di materiale conduttivo in grado di immagazzinare al suo interno una certa quantità di energia sotto forma di onde elettromagnetiche stazionarie. L'energia associata ad una generica onda è riflessa dalle pareti verso l'interno del volume della cavità; generalmente le riflessioni casuali si comportano come sorgenti incoerenti, in tal modo l'onda si annulla per interferenza distruttiva e l'oscillazione non è permessa. Esistono però alcune frequenze caratteristiche della struttura per cui questo non accade e la sovrapposizione delle onde riflesse dà luogo ad uno stato stazionario e se le pareti della cavità si comportano come conduttori perfetti l'energia è conservata infinitamente. I campi oscillanti presenti

Teoria e applicazioni delle strutture a banda fotonica

all'interno della struttura inducono una distribuzione di carica e di corrente sulla superficie³.

L'efficienza di una cavità risonante si misura attraverso il suo *fattore di qualità Q* che viene definito come il rapporto tra l'energia immagazzinata e la potenza dissipata in ogni ciclo della radiofrequenza:

$$Q = \frac{\omega U}{P_d} \quad \text{Eq. 1-1}$$

Dove: $\omega = 2\pi f$ è la frequenza di risonanza della cavità,

U è l'energia totale immagazzinata nella cavità,

P_d è la potenza totale dissipata all'interno della cavità.

Il fattore di qualità è un indice di quanto la cavità riesca a conservare nel tempo l'energia immagazzinata, infatti è interpretabile come proporzionale al numero di oscillazioni alla frequenza risonante che il sistema compie prima di dissipare 1/e dell'energia totale immagazzinata, quando non è alimentato da fonti esterne.

Vale perciò la relazione:

$$Q = 2\pi f \tau \quad \text{Eq. 1-2}$$

Dove τ è il tempo di decadimento dell'energia all'interno della cavità.

L'energia immagazzinata nella cavità in funzione della frequenza di eccitazione ha la forma di una curva a campana, l'intervallo compreso tra i due valori di frequenza che a parità di potenza inviata in cavità producono il dimezzamento dell'energia immagazzinata viene detto *larghezza di banda* della cavità.

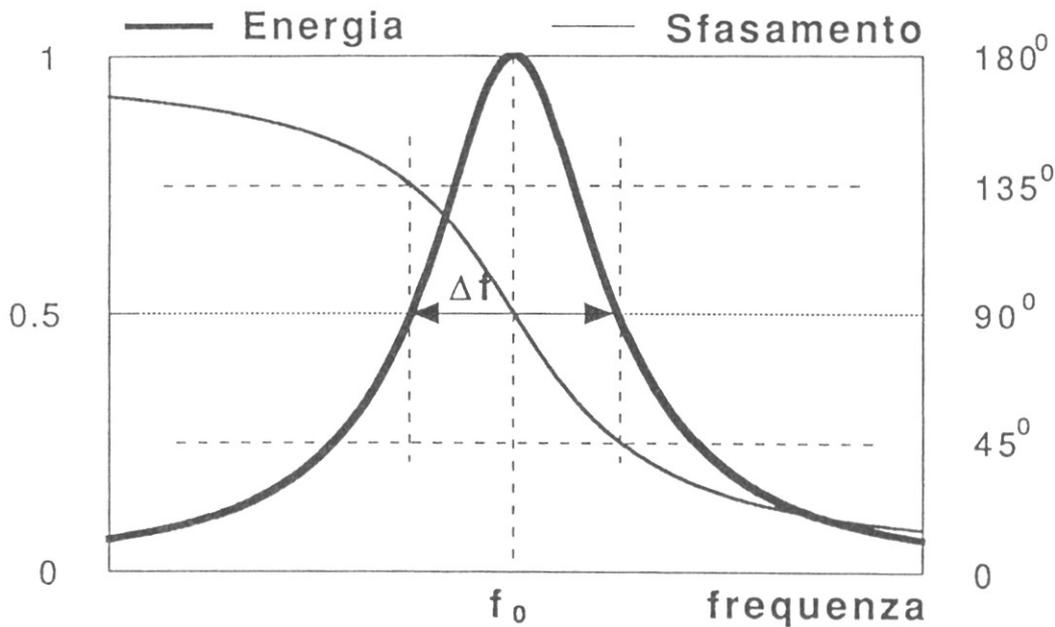


Figura 3: larghezza di banda alla frequenza di risonanza.

Il Q è collegato alla larghezza di banda dalla relazione⁴:

$$Q = \frac{f}{\Delta f}$$

Eq. 1-3

Una cavità risonante completamente differente da quelle tradizionali può essere ottenuta introducendo un difetto all'interno di una struttura a banda fotonica, in questo modo si ottiene un modo risonante localizzato all'interno della banda proibita, che si può eccitare senza eccitare contemporaneamente modi di ordine superiore in quanto questi ricadono all'interno del gap di banda. È dimostrato inoltre che la larghezza spettrale del modo di difetto diminuisce rapidamente all'aumentare delle ripetizioni del reticolo periodico migliorando la selettività in frequenza all'interno del gap di banda.

La costruzione di cavità risonanti PBG operanti nel campo delle microonde si sta dimostrando una possibilità promettente per la realizzazione di acceleratori di particelle, infatti la peculiarità delle PBG fa sì che sia possibile realizzare strutture acceleranti **monomodali**, strutture cioè in cui sia possibile eccitare un solo modo risonante (quello di difetto) sopprimendo in modo molto efficiente i modi dei campi scia a frequenze superiori che causano instabilità del fascio di particelle.

Una tipica struttura accelerante PBG è costituita da un reticolo esagonale di cilindretti metallici o di dielettrico racchiusi tra due piastre metalliche, il modo di difetto si ottiene eliminando il cilindro centrale, in modo tale da creare anche un percorso per il fascio di particelle cariche che attraversa la cavità in corrispondenza del difetto stesso. Si utilizza

Teoria e applicazioni delle strutture a banda fotonica

una struttura a reticolo triangolare perché ha un impaccamento maggiore rispetto ad una quadrata ed un maggior numero di primi vicini, in questo modo il modo di difetto centrale sarà maggiormente confinato dai cilindretti adiacenti; misure effettuate da Schultz et. al.¹ indicano uno smorzamento dei campi di circa il 30% più veloce rispetto ad una struttura quadrata con parametri simili che si riflette sulla possibilità di realizzare strutture con dimensioni laterali più compatte a parità di Q.

In un **reticolo quadrato** i vettori di traslazione della cella elementare sono:

$$\mathbf{a}_1 = ax; \mathbf{a}_2 = ay$$

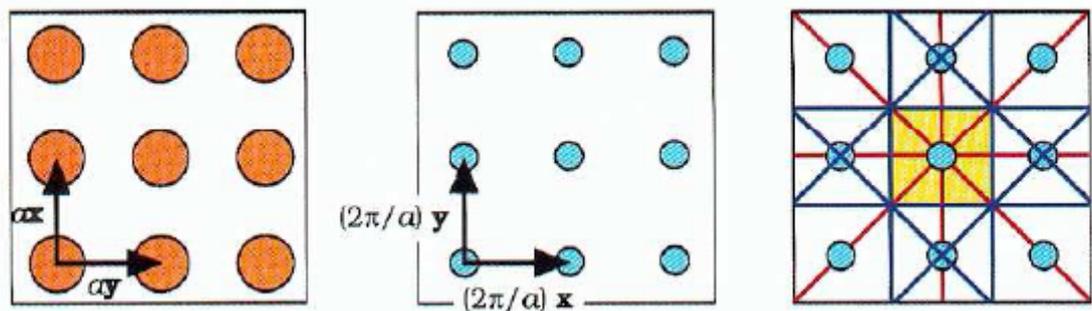


Figura 4: reticolo diretto, reticolo reciproco e prima zona di Brillouin per la cella quadrata⁵

in un **reticolo triangolare** i vettori di traslazione della cella elementare sono:

$$\mathbf{a}_1 = \left(\frac{y + x\sqrt{3}}{2} \right); \quad \mathbf{a}_2 = \left(\frac{y - x\sqrt{3}}{2} \right)$$

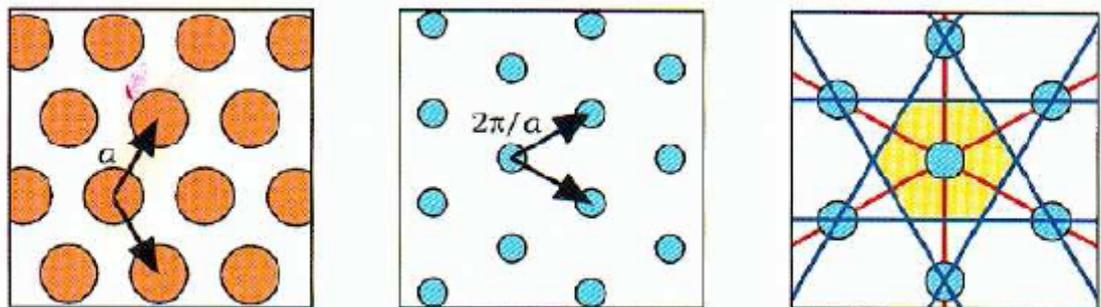


Figura 5: reticolo diretto, reticolo reciproco e prima zona di Brillouin per la cella esagonale⁵

Poiché il volume della cella unitaria è dato da $\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2$ sarà:

volume cella quadrata : a^2

volume cella esagonale : $a^2 \sqrt{3}$

per cui l'impaccamento è maggiore nel caso della cella esagonale.

Negli ultimi anni diversi studi si sono focalizzati sulla costruzione di acceleratori di particelle basati su strutture PBG, sia di tipo metallico che dielettrico, un esempio è la realizzazione di PBG a struttura esagonale composte dall'alternarsi periodico di fori in una struttura di silice. Un difetto di tipo lineare – una fila mancante nel reticolo – funge da guida d'onda per un laser capace di accelerare fasci di elettroni. In questo caso la cavità viene costruita con tecniche di fotolitografia⁶.

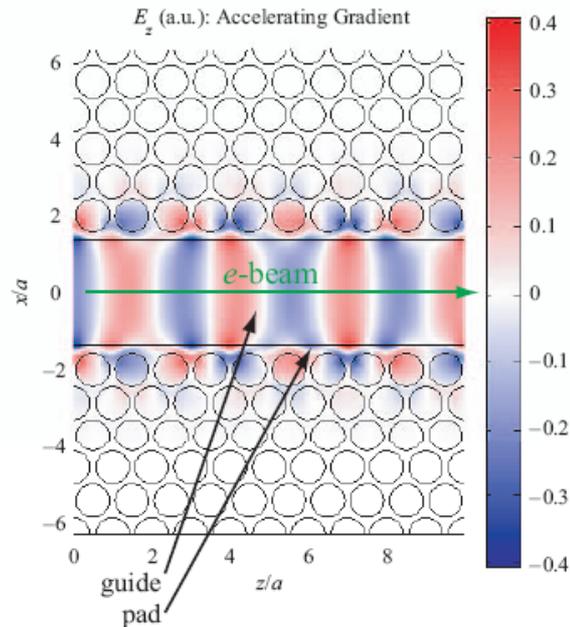


Figura 6: guida d'onda PBG dielettrica per accelerazione di fasci elettronici mediante laser (da ref. 6).

L'impiego di cavità PBG potrebbe migliorare le prestazioni e diminuire i costi degli acceleratori di particelle perché:

1. le cavità PBG sono strutture aperte che possono sostituire le pareti metalliche di una cavità *pillbox* per realizzare superfici perfettamente riflettenti teoricamente prive di perdite per assorbimento;
2. i modi di ordine superiore vengono soppressi dalla cavità stessa senza dover ricorrere ad accorgimenti particolari;
3. si possono impilare più cavità realizzando strutture multicella molto compatte che possiedano elevati gradienti di accelerazione;
4. è possibile ottimizzare l'accoppiamento tra la cavità e le antenne poiché l'antenna non perturba la zona centrale della cavità in cui il campo è molto forte e quindi non genera variazioni di frequenza consistenti nella struttura.

Rappresentazione matematica delle strutture a banda fotonica

In una PBG metallica l'onda elettromagnetica si propaga nell'area non occupata dai cilindri e l'arrangiamento periodico dei cilindri stessi impone il confinamento del modo risonante all'interno della regione difettuale, e di conseguenza l'assenza di altri modi propaganti all'interno del gap di banda.

Come già detto, in una struttura PBG il campo elettrico subisce l'influenza di una variazione periodica della costante dielettrica che induce i fotoni a comportarsi come farebbero gli elettroni sottoposti al potenziale del reticolo cristallino di un semiconduttore, in sostanza una struttura PBG rappresenta per il campo elettrico quello che è un cristallo per la funzione d'onda degli elettroni.

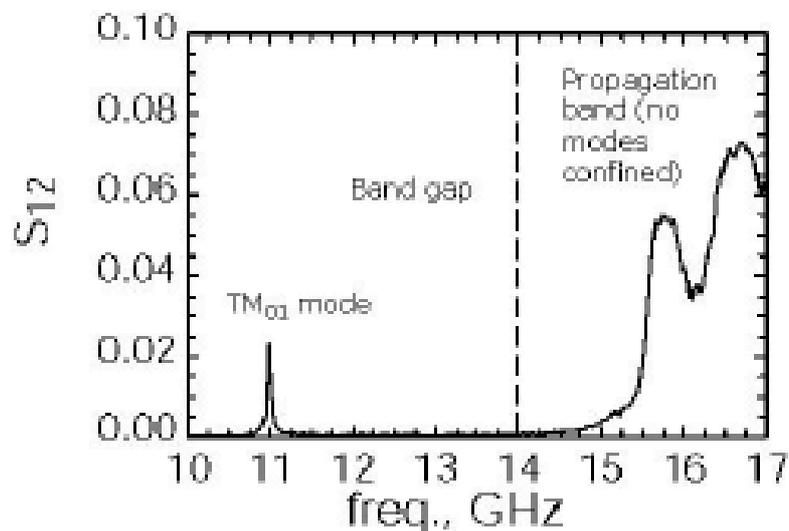


Figura 7: curva di trasmissione per un risonatore PBG⁷

La Figura 7 mostra la curva di trasmissione per una cavità risonante PBG ad 11 GHz, si nota chiaramente il modo di difetto all'interno del gap di banda e l'assenza di modi di ordine superiore; al di sopra di 14 GHz si è oltrepassata la banda proibita e quindi è possibile la trasmissione di modi risonanti ulteriori non confinati.

Il campo elettromagnetico all'interno della cavità PBG è descrivibile dalle equazioni di Maxwell, semplificate in accordo con le seguenti assunzioni:

- I materiali usati sono isotropi e a risposta istantanea e la costante dielettrica è indipendente dalla frequenza, per cui:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})$$

- La densità di corrente nel vuoto è nulla e non c'è distribuzione di carica iniziale:

$$\mathbf{J} = 0 \quad \rho = 0$$

- Vale la proporzionalità tra \mathbf{M} e \mathbf{H} e la permeabilità magnetica è circa 1:

$$\mathbf{B} \approx \mathbf{H}.$$

Per cui si ha:

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{c} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad \text{Eq. 1-4}$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot [\varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)]$$

$$\nabla \cdot [\varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)]$$

Riarrangiando le quattro equazioni di Maxwell si ottiene un'espressione per il campo elettrico:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \quad \text{Eq. 1-5}$$

Il valore della costante dielettrica è nullo o unitario a seconda che \mathbf{r} punti sul metallo o sul vuoto. Poiché le equazioni di Maxwell sono lineari in t e \mathbf{r} , si possono separare le variabili e supponendo una dipendenza temporale del tipo $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \exp(-i\omega t)$ si può riscrivere

Eq. 1-5 come:

$$-\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \frac{\varepsilon(\mathbf{r}) - 1}{c^2} \omega^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad \text{Eq. 1-6}$$

Il campo elettrico nella cavità si comporta come le funzioni d'onda elettroniche nel potenziale periodico di un cristallo, quindi le soluzioni dell'Eq. 1-6 dovranno soddisfare il teorema di Blochⁱ:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_k(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad \text{Eq. 1-7}$$

$$\mathbf{E}_k(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_k(\mathbf{r} + \mathbf{R})$$

Ottenendo per il campo elettrico una forma del tipo:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{k}} \mathbf{E}_{\mathbf{k}} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$\mathbf{k} = \frac{r_1}{N_1} \mathbf{b}_1 + \frac{r_2}{N_2} \mathbf{b}_2 \quad \text{Eq. 1-8}$$

ⁱ Il teorema di Bloch afferma che: *le autofunzioni della funzione d'onda per un potenziale periodico sono il prodotto di un'onda piana $\exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ per una funzione $\mathbf{E}_k(\mathbf{r})$ che ha la stessa periodicità del reticolo che genera il potenziale.* Per ulteriori dettagli vedere: C. Kittel, Introduction to Solid State Physics 7th ed, John Wiley, 1996.

E per la funzione dielettrica:

$$\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon_b + \sum_{\mathbf{G}} \varepsilon_{\mathbf{G}} \exp(i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})$$

Eq. 1-9

$$\mathbf{G} = n_1 \mathbf{b}_1 + n_2 \mathbf{b}_2$$

Introducendo queste due espressioni in Eq. 1-6 si ottiene un'equazione per il campo elettrico da cui, costruendo una matrice agli autovalori tramite le incognite E , e sostituendo i valori noti dei vettori \mathbf{G} del reticolo reciproco, si possono ottenere i valori di ω fissato \mathbf{k} , cioè si può conoscere la struttura a bande della cavità PBGⁱⁱ.

ⁱⁱ Per maggiori dettagli sui calcoli vedere riferimento 5.

Capitolo 2

Progettazione e realizzazione delle cavità

Viene qui descritto il progetto di cavità a banda fotonica superconduttive operanti a 14 e 6 GHz e viene delineato il metodo di realizzazione sviluppato, che permette di ottenere strutture risonanti PBG senza saldature

Approccio costruttivo

Nel progetto di una cavità risonante di tipo PBG si deve tener conto dei seguenti parametri:

- a. tipo di reticolo
- b. frequenza del modo di difetto, che dipende da: altezza, diametro e numero di cilindri diffusori; distanza fra i centri dei cilindri; altezza e geometria dei piatti; dimensioni delle *beam ports*.
- c. Materiali utilizzati.

Le cavità progettate e realizzate presso i Laboratori Nazionali di Legnaro adottano per i parametri sopra elencati queste soluzioni:

- reticolo** Struttura a cella esagonale che permette un più efficiente confinamento del campo elettrico attorno al modo di difetto
- Frequenza** Sono stati realizzati prototipi con due diverse frequenze di risonanza: 14 e 6 GHz; nelle cavità a 14 GHz il confinamento del campo è assicurato da tre serie concentriche di cilindri, mentre quelle a 6 GHz sono state realizzate sia con tre file che con quattro in modo da avere un modo di difetto maggiormente confinato e localizzato
- Materiali** L'obiettivo è quello di realizzare una cavità ad alto Q, quindi oltre alle prove in rame OFHCⁱ sono state realizzate due cavità (una 6GHz ed una 14 GHz) in niobio superconduttivoⁱⁱ.

Tradizionalmente le cavità PBG interamente metalliche sono costruite fissando tramite viti dei cilindretti metallici sui cui sono stati praticati dei fori secondo il reticolo periodico desiderato, il

ⁱ **Oxygen Free High Conductivity**, rame di elevata purezza la cui resistività residua a bassa temperatura è molto bassa.

ⁱⁱ Un parametro per valutare la qualità di un superconduttore è il suo **RRR** (Residual Resistivity Ratio) cioè il rapporto fra la sua resistività a temperatura ambiente quella che possiede a temperatura immediatamente superiore a quella di transizione $RRR = \rho_{300K} / \rho_{10K} = \rho_{ph}(T) + \rho_i / \rho_i$; Essendo la resistività di un metallo costituita da due termini: uno dovuto alle impurezze che si può considerare indipendente da T ed uno dovuto alle vibrazioni reticolari (fononi) che dipende dalla temperatura e si annulla per $T \rightarrow 0$. Un RRR alto indica un materiale di elevata purezza, in quanto l'unico termine presente a denominatore è quello dovuto alle impurità. Il niobio normalmente usato per le cavità acceleratrici ha $RRR=300$.

Progettazione e realizzazione delle cavità

serraggio dei dadi assicura il contatto elettrico fra i cilindretti e le basi. Nel caso di cavità superconduttrici questo approccio non è praticabile perché la zona dei cilindretti è quella interessata da elevati campi e quindi dal passaggio delle supercorrenti, il semplice contatto meccanico tra base e colonnina non assicura la continuità del superconduttore a causa dell'inevitabile formazione di ossido nativo sulle superfici a contatto. La Figura 8 mostra una PBG in ottone costruita avvitando i cilindretti sulle basi⁸.

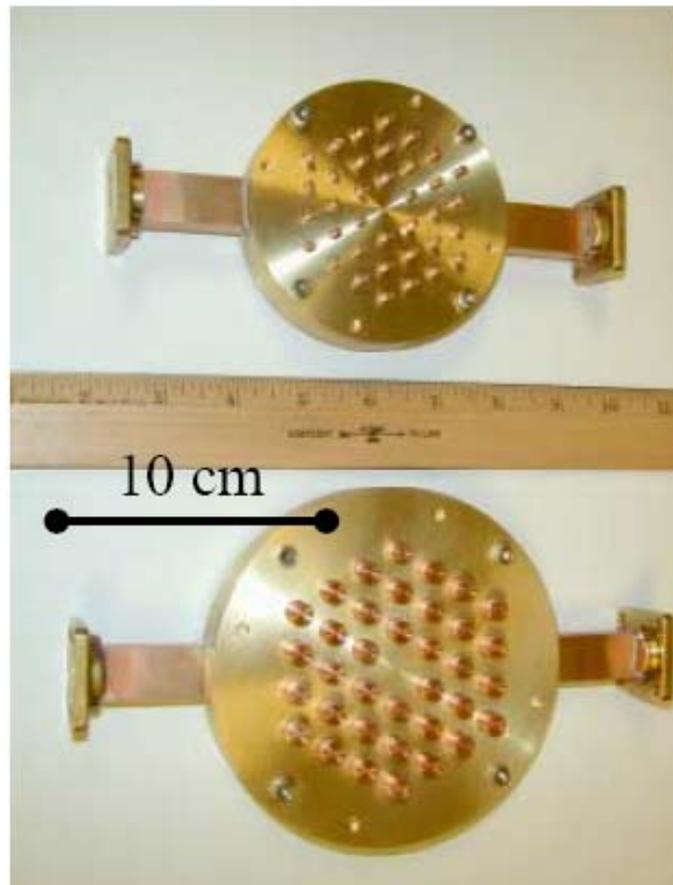


Figura 8: PBG in ottone realizzata bloccando le colonnine con delle viti.

La necessità di mantenere inalterate le proprietà superconduttive del niobio che costituisce la cavità pone dei limiti particolarmente stretti per quanto riguarda i possibili approcci costruttivi, in particolare deve essere mantenuta la continuità del superconduttore in tutte le parti componenti il risonatore allo scopo di evitare zone dissipative in cui durante il funzionamento a freddo le correnti causino un aumento locale della temperatura tale da far ritornare il materiale circostante in stato normal conduttivo, distruggendo così le prestazioni dell'intera struttura; per questo motivo il progetto non prevede che la cavità sia composta di parti che vengono fissate fra loro tramite viti o bulloni. Un'ulteriore difficoltà sta nel fatto che il niobio ha una temperatura di fusione di 2468°C , quindi saldare due parti di questo metallo è piuttosto difficoltoso e in più i metodi di saldatura tradizionali introducono notevoli quantità di impurezze e contribuiscono ad ossidare il metallo

Progettazione e realizzazione delle cavità

creando zone in cui le proprietà superconduttive sono fortemente degradate. L'utilizzo di saldature *electron beam*ⁱⁱⁱ in vuoto permette di risolvere questi problemi, però è estremamente costoso, per cui si è preferito utilizzare un approccio costruttivo che non richieda l'utilizzo di saldature. In una struttura PBG utilizzare la saldatura *electron beam* sarebbe proibitivo in termini di costi e tempi di costruzione, perché si dovrebbero saldare fra loro tutte le basi degli elementi che costituiscono la struttura periodica (36 nel caso di una cavità con 3 serie di colonnine), utilizzando sicuramente più di un ciclo di apertura e chiusura della camera da vuoto.

Si è perciò sviluppato un metodo di costruzione che permette di realizzare la cavità direttamente in un pezzo unico, senza dover ricorrere a nessuna saldatura in modo da ridurre significativamente i costi ed i tempi di produzione; questo metodo, testato prima sul rame ed utilizzato sia per produrre i prototipi a 14 che quelli a 6 GHz è in attesa di essere brevettato.

In conclusione sono state realizzate le seguenti cavità:

2 cavità 14 GHz in rame

2 cavità 14 GHz in niobio

1 cavità 6 GHz in rame con 3 file di colonnine,

2 cavità 6 GHz in rame con 4 file di colonnine,

1 cavità 6 GHz in niobio con 3 file di colonnine

per un totale di 8 risonatori.

Progetto

La tecnica utilizzata per realizzare le cavità non permette di realizzare il reticolo periodico con dei cilindri metallici, ma con delle colonnine a pianta esagonale e dalla forma rastremata; l'utilizzo di esagoni e non di cilindri non crea problemi specifici, mentre la variazione di diametro delle colonnine lungo l'asse z (quello in cui è diretto il campo elettrico accelerante) provoca una perdita di simmetria che può avere effetti sul confinamento del campo alla frequenza del modo di difetto. Le misure in radiofrequenza testimoniano però (vedi capitoli successivi) che questo effetto non impedisce di eccitare il modo di difetto e di sopprimere tutti i modi risonanti di ordine superiore, almeno nel range di frequenze operative della strumentazione disponibile.

Nelle tabelle seguenti sono elencati i parametri importanti delle cavità costruite.

ⁱⁱⁱ Nella saldatura *electron beam* il calore necessario per la fusione delle estremità dei pezzi da saldare viene fornito da un fascio di elettroni prodotti da un'apposita sorgente, accelerati da un campo elettrico e focalizzati da un campo magnetico. Il processo va compiuto sotto vuoto per impedire l'interazione degli elettroni con le molecole dell'aria e per evitare la diffusione di impurità all'interno delle parti di materiale allo stato liquido.

Progettazione e realizzazione delle cavità

Tabella 1: parametri costruttivi della cavità a 14 GHz

\varnothing_{\min} colonnine	1.5 mm
N° colonnine	36 (3 serie)
N° primi vicini al difetto	6 (reticolo esagonale)
Interasse colonnine	6.5 mm
Altezza piatti	3.0 mm
\varnothing foro beam port	5.0 mm
\varnothing totale	54.5 mm

Tabella 2: parametri costruttivi della cavità a 6 GHz e 3 serie di colonnine

\varnothing_{\min} colonnine	8.0 mm
N° colonnine	36 (3 serie)
N° primi vicini al difetto	6 (reticolo esagonale)
Interasse colonnine	30.0 mm
Altezza piatti	10.0 mm
\varnothing foro beam port	22.0 mm
\varnothing totale	180.0 mm

Tabella 3: parametri costruttivi della cavità a 6 GHz e 4 serie di colonnine

\varnothing_{\min} colonnine	3.40 mm
N° colonnine	60 (4 serie)
N° primi vicini al difetto	6 (reticolo esagonale)
Interasse colonnine	16.4 mm
Altezza piatti	6.0 mm
\varnothing foro beam port	8.0 mm
\varnothing totale	160.0 mm

Le cavità di questo tipo, essendo strutture aperte, presentano problemi per quanto riguarda la loro messa in vuoto perché non possono essere pompate dall'interno come avviene nei tradizionali risonatori tipo *pillbox*; per questo motivo nei prototipi a 6 GHz si è praticato il foro per il passaggio del fascio solo su uno dei due piatti in modo da utilizzare l'altro come superficie di tenuta da vuoto

Progettazione e realizzazione delle cavità

e per l'elio liquido di raffreddamento, alla luce del fatto che queste cavità verranno utilizzate solo come strutture di prova e non per accelerare particelle. Nell'eventualità di un loro futuro utilizzo in un acceleratore sarà quindi necessario anche progettare un criostato adatto. Un'ulteriore variazione rispetto al progetto delle 14 GHz riguarda il raffreddamento della cavità con elio liquido (vedi capitoli successivi) che è previsto avvenire attraverso un serbatoio in contatto con il piatto non forato: data la maggiore massa delle strutture a 6 GHz si è ritenuto che un contatto del liquido solo con il piatto non sia sufficiente a portare ad una temperatura uniforme tutto il risonatore, per cui sono stati praticati dei fori non passanti in asse con le colonnine, all'interno del quale possa penetrare l'elio e raffreddare le colonnine stesse dall'interno.



Figura 9: PBG a 6 GHz in rame, piatto superiore con i fori di raffreddamento (sx), piatto inferiore con la *beam port* (dx)

Nella Figura 9 sono mostrate due viste della cavità a 6 GHz. Sul piatto superiore sono stati praticati i fori di raffreddamento che sono in asse con le colonnine sottostanti e terminano all'altezza del piatto inferiore sul quale invece è presente un foro centrale in corrispondenza del difetto nel reticolo.

Figura 10 e Figura 11 sono estratti dal progetto della cavità a 6 GHz, si nota la struttura periodica esagonale ed i fori di raffreddamento coassiali con le colonnine. Le sei colonnine più esterne non hanno i fori di raffreddamento per poter offrire lo spazio necessario alla flangia di tenuta da vuoto superiore (descritto a pag. 32).

Progettazione e realizzazione delle cavità

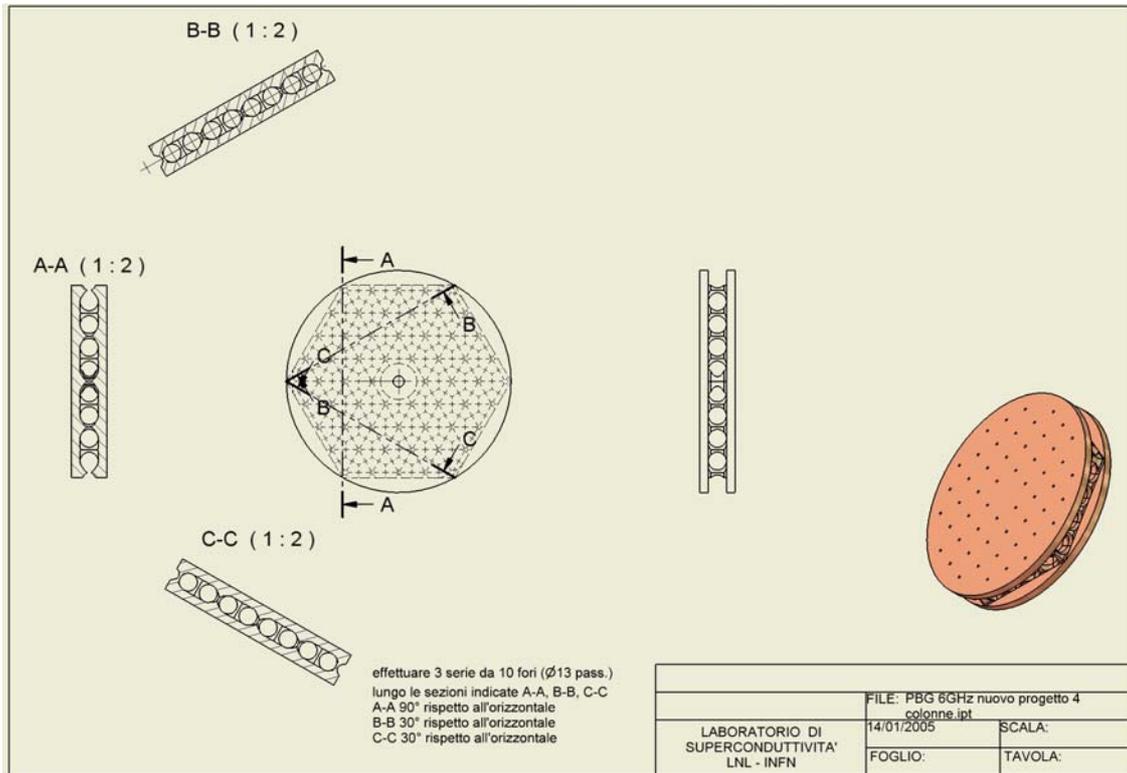


Figura 10: progetto della cavità PBG 6GHz con 4 serie di colonnine

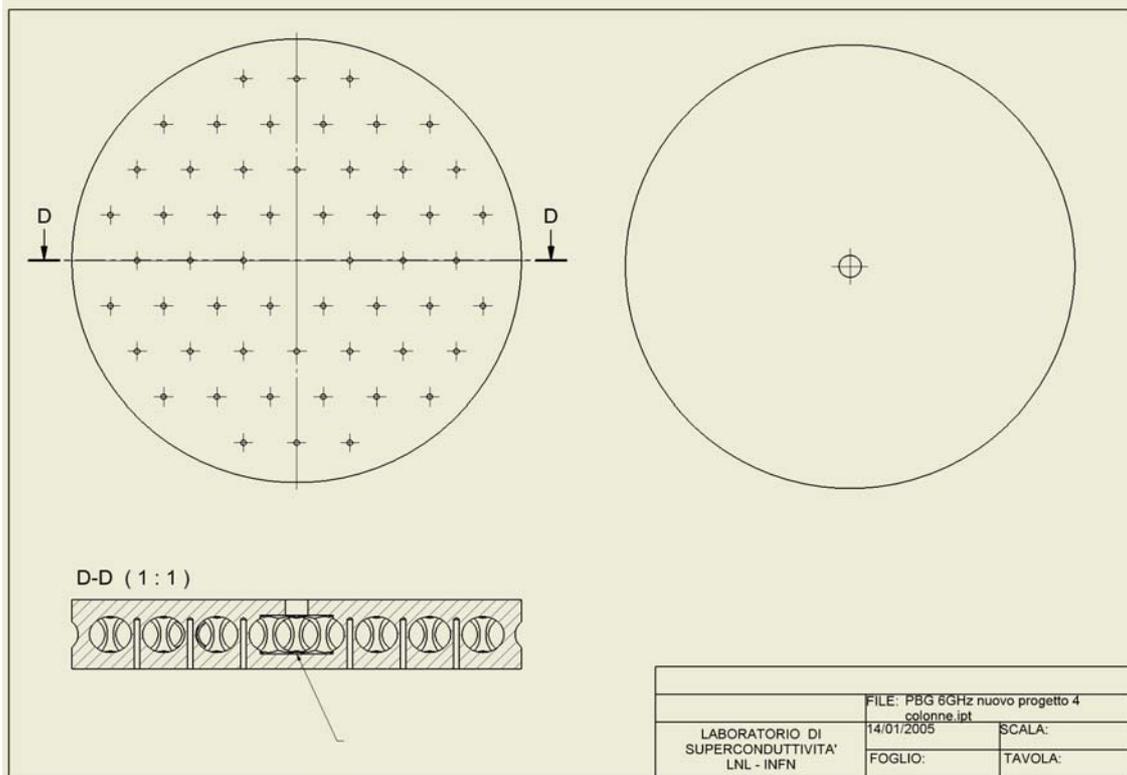


Figura 11: progetto della cavità PBG 6GHz con 4 serie di colonnine

La Figura 12 mostra una sezione della PBG 6 GHz con quattro serie di colonnine; si nota la forma rastremata delle colonne stesse, il cilindro mancante al centro che funge da difetto ed il foro sul piatto inferiore che funge da *beam port*. Pur conservando il reticolo esagonale si è preferito realizzare i piatti circolari in modo da permettere un confinamento maggiore del campo e da

Progettazione e realizzazione delle cavità

semplificare le lavorazioni meccaniche necessarie per costruire la cavità. A parte le dimensioni ed il numero di colonne la struttura dei risonatori a 14 GHz è del tutto analoga. Non ci sono state variazioni di progetto nel passare dalle cavità in rame a quelle in niobio per cui cavità dello stesso tipo ma di materiale diverso sono del tutto identiche fra loro.

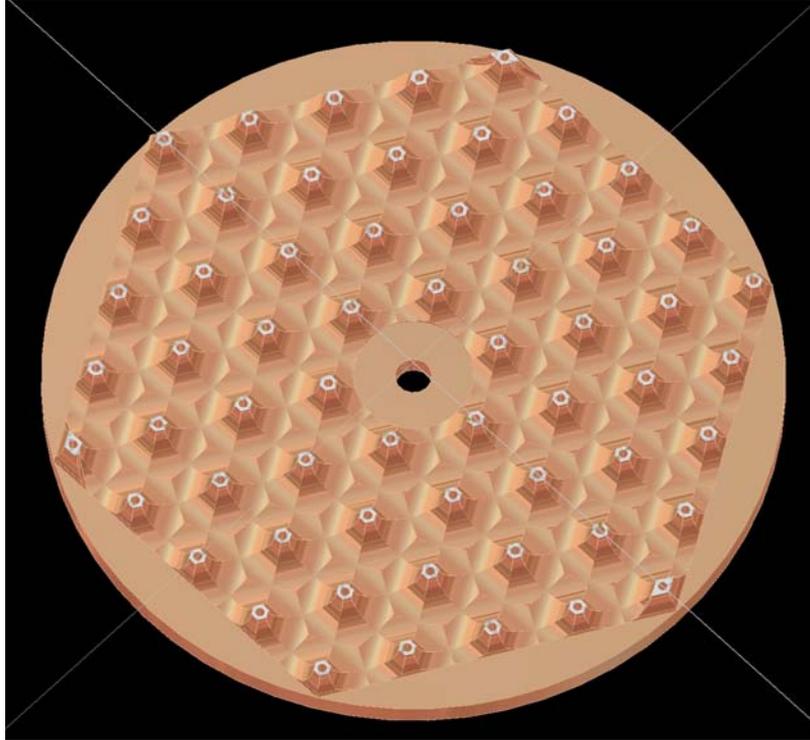


Figura 12: sezione della cavità PBG lungo il piano mediano parallelo ai piatti

Realizzazione

Le cavità a 14 GHz – di dimensioni minori – sono state realizzate presso l’officina dei Laboratori Nazionali di Legnaro con il duplice scopo di ottenere un prototipo misurabile e di testare il metodo costruttivo realizzato. Una volta verificata la fattibilità della procedura si è proceduto con la lavorazione di un risonatore a 6 GHz adattando opportunamente le tecniche realizzative per una struttura dalle dimensioni maggiori.

Un’altra serie di cavità, con frequenza di risonanza 6 GHz e quattro serie di colonnine, è stata invece commissionata ad una ditta esterna specializzata in costruzione di componenti meccanici per ultra alto vuoto, che ha lavorato a stretto contatto con il laboratorio sia per l’implementazione delle tecniche costruttive che per le indicazioni sulla metallurgia del niobio che necessita di particolare cura nelle lavorazioni meccaniche per non essere contaminato e degradare le sue proprietà superconduttive.

Il ricorso ad un’officina esterna è stato fatto nell’ottica di un futuro utilizzo di questo tipo di cavità in un acceleratore reale, e quindi di una produzione su media scala di risonatori; in questo

Progettazione e realizzazione delle cavità

senso è quindi necessario implementare dei metodi di lavorazione che permettano di minimizzare le tempistiche e che possano essere facilmente automatizzati in una realtà industriale.

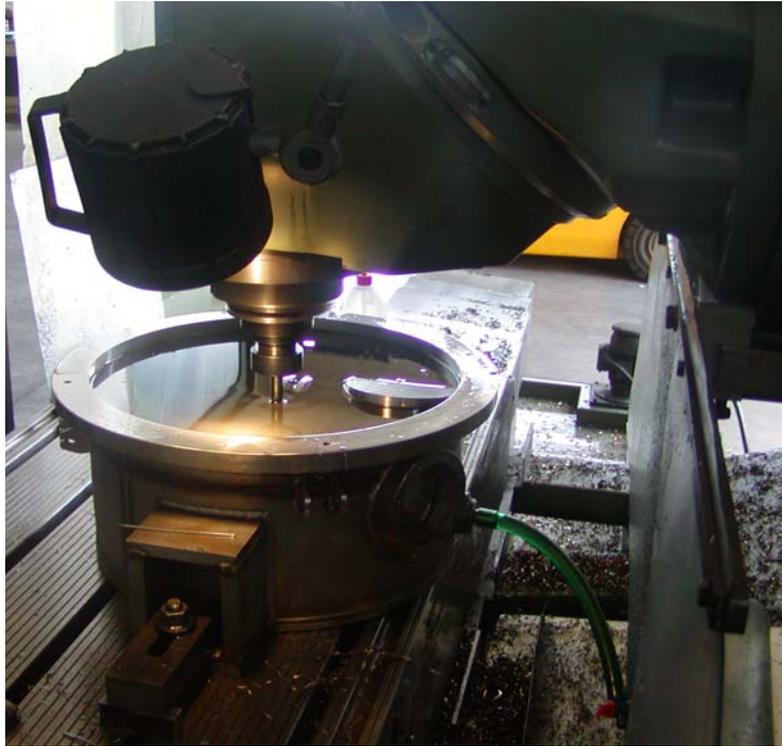


Figura 13: lavorazione della cavità 6 GHz in niobio

Nella Figura 13 si vede una fase di realizzazione della cavità in niobio. Il pezzo è posto in bagno d'olio di oliva per evitare il suo surriscaldamento a contatto con l'utensile ed il lubrificante utilizzato è di origine vegetale per impedire la contaminazione che può originarsi dai comuni oli per lavorazioni meccaniche.

La **Figura 14** mostra l'olio d'oliva acquistato appositamente per la lavorazione meccanica della cavità in niobio.



Figura 14: olio vegetale usato per a lavorazione della PBG in niobio

Capitolo 3

Trattamenti di superficie

Il capitolo elenca i trattamenti di superficie che una cavità PBG subisce prima di essere misurata, spiegando perché vengono effettuati e quali sono gli effetti sulle prestazioni di un risonatore, con particolare attenzione alle cavità superconduttive.

Finitura superficiale di una cavità acceleratrice

Le lavorazioni meccaniche lasciano la superficie di una cavità ben lontana dagli standard di finitura e pulizia richiesti per ottenere prestazioni soddisfacenti nelle misure in radiofrequenza, in particolare le lavorazioni all'utensile lasciano bave attaccate agli spigoli di taglio, la rugosità è troppo elevata ed è presente una forte contaminazione dovuta a residui di olio, impronte di mani, polvere ecc.

La superficie della cavità deve essere il più liscia e priva di contaminazioni possibili perché la presenza di impurità superficiale può provocare emissione di campo, mentre la rugosità del materiale contribuisce ad aumentare la resistività superficiale del niobio portando ad un decadimento delle prestazioni superconduttive e quindi alla diminuzione del Q. Una superficie rugosa porta inoltre ad aumenti locali dei campi elettromagnetici che possono causare un prematuro **thermal breakdown** cioè una transizione dallo stato superconduttivo a quello normale nelle aree in cui i campi sono superiori a quelli critici; in tali aree non superconduttive le correnti circolanti generano calore per effetto Joule e quindi la temperatura aumenta causando la transizione allo stato normale delle zone circostanti, con un effetto a catena su tutto il risonatore.

Allo scopo di migliorare le prestazioni in radiofrequenza, la cavità prima di essere misurata subisce una serie di trattamenti di tipo fisico, chimico e meccanico volti a migliorare le sue prestazioni come elemento risonante. Inoltre, prima di ogni misura è necessario portare la superficie in condizioni tali da poter sostenere l'ultra alto vuoto, cioè si devono eliminare il più possibile tutte le sorgenti di contaminazione da parte di elementi che possono evaporare in vuoto e si devono ridurre le superfici degassanti.

Finitura meccanica

La cavità così come uscita dalle lavorazioni meccaniche presenta bave e trucioli residui incastrati fra i cilindretti che devono essere rimossi prima di qualsiasi altro trattamento; la peculiare struttura

Trattamenti

delle PBG impedisce di levigare efficacemente le superfici interne con metodi tradizionali di finitura meccanica. Dopo aver eliminato manualmente i residui più grossolani e rimosso tutti i trucioli incastrati fra le colonnine, si è passati al trattamento di finitura meccanica vero e proprio.

La prima ipotesi di finitura proposta è stata la burattaturaⁱ della cavità, ma con questa tecnica non è possibile penetrare in profondità negli spazi all'interno dei cilindri, vicino alla zona difettuale dove il campo elettrico è più intenso e quindi è necessaria maggiore cura nei trattamenti superficiali. È quindi stato realizzato un utensile cilindrico abbastanza stretto per entrare nella cavità, la cui superficie abrasiva è costituita da un foglio di Scotch Brite®, che messo in rotazione permetta di levigare la superficie interna della cavità.

Su una delle due cavità a 6 GHz in rame si è tentato di rimuovere le bave utilizzando la micropallinatura. Tale tecnica consiste nel sparare sul pezzo con un getto di aria compressa delle sferette di vetro con un diametro di 90 µm, le sferette, urtando ad alta velocità contro la superficie, hanno un forte effetto abrasivo che rimuove i trucioli e le bave di metallo, lasciando la superficie con un caratteristico aspetto satinato. Tale metodo si è però rivelato inadatto ed anche dannoso per il trattamento delle cavità in quanto la rimozione delle bave è accompagnata da un danneggiamento della superficie del metallo che aumenta fortemente la sua rugosità; da un incremento del livello di contaminazione perché le sferette di vetro trascinano con sé polvere e gocce di olio del compressore per l'aria compressa e infine dalla possibilità che alcune microsferiche si impiantino nel metallo formando zone di accumulo di sporcizia e contaminazione. Tutti questi effetti negativi si riflettono in un peggioramento sensibile delle prestazioni in radiofrequenza del risonatore ed in definitiva in un peggioramento del suo fattore di merito.

Per queste ragioni dopo la prima prova l'idea della pallinatura è stata definitivamente abbandonata.

Pulizia con solventi

Dopo la finitura meccanica la cavità necessita ancora di trattamenti di pulizia atti a rimuovere i residui del lubrificante usato per le lavorazioni meccaniche – che sono presenti in modo consistente soprattutto nella cavità in niobio, realizzata in bagno d'olio – e i resti dell'abrasivo lasciati dalla pulizia meccanica. Prima dei processi successivi è necessario – soprattutto per la cavità in niobio – rimuovere tali residui ed in particolare sciogliere il velo di olio che ricopre le superfici della cavità. In questo stadio quindi si sottopone il pezzo a prolungati lavaggi con tetracloroetilene, acetone ed etanolo allo scopo di solubilizzare e rimuovere gli idrocarburi.

ⁱ La burattatura è un processo di finitura meccanica in cui il pezzo da trattare è inserito in un contenitore assieme a dei mezzi abrasivi di forma, dimensione e materiale variabile ed – eventualmente – ad acqua e prodotti chimici. Il contenitore viene poi fatto ruotare su uno o più assi per un tempo variabile da una alle decine di ore. In questo modo l'azione di sfregamento degli abrasivi contro il pezzo ne permette la sgrassatura o la lucidatura.

Trattamenti

Per quanto riguarda la PBG 6 GHz in niobio questo processo è stato ripetuto svariate volte, lasciando la cavità immersa nell'etanolo per diverse ore in quanto la contaminazione da olio era molto elevata, soprattutto nelle parti più strette e meno accessibili, come per esempio i fori di raffreddamento. In quest'ultimo caso la necessità era non tanto quella di preparare la superficie per i successivi trattamenti di finitura superficiale, in quanto la zona non è interessata dal campo a radiofrequenza, ma quella di eliminare tutti i residui che esposti a temperatura criogenia potessero congelare formando dei tappi solidi che rendessero impossibile l'entrata dell'elio liquido. Una situazione di questo tipo è particolarmente pericolosa poiché una disuniformità di temperatura porta ad una variazione locale delle proprietà superconduttive della cavità e – unita alla presenza di zone dissipative (impurezze, inclusioni, ecc.) addirittura ad un innalzamento della temperatura al di sopra di quella di transizione del niobio con un conseguente passaggio allo stato normal conduttivo.

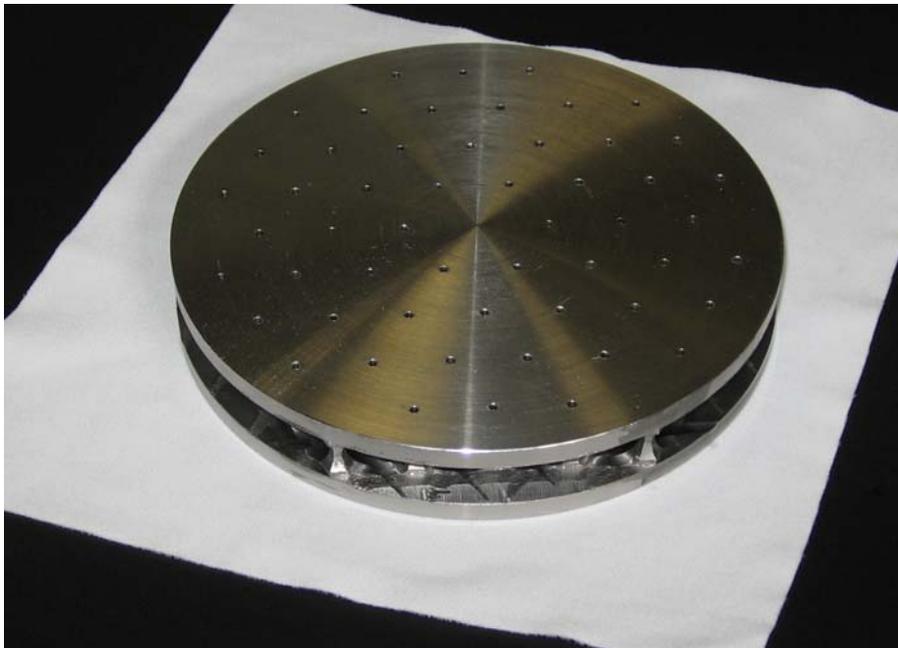


Figura 15: cavità 6 GHz in niobio dopo la pulizia con solventi

Sgrassaggio ad ultrasuoni

L'ultimo stadio di pulizia prima della lucidatura chimica è lo sgrassaggio in vasca ad ultrasuoni con acqua e detergente ed il successivo risciacquo in ultrasuoni con acqua deionizzata a 18 MΩcm. Questo trattamento consiste nell'immergere la cavità in una vasca dotata di un trasduttore che trasmette al liquido nella vasca vibrazioni meccaniche con frequenza molto elevata (20 – 10000 KHz) che creano onde di compressione e decompressione nel liquido stesso; se l'intensità è sufficientemente elevata si verifica il fenomeno della *cavitazione*: nel liquido si crea una grande quantità di bollicine dovute alla decompressione che implodono violentemente nella successiva fase di compressione, creando pressioni locali altissime. La serie di implosioni crea un'azione meccanica tale da rimuovere lo sporco anche dalle zone difficilmente raggiungibili del pezzo, come porosità o

Trattamenti

fori stretti; in aggiunta il fenomeno della cavitazione si origina di preferenza in prossimità delle superfici solide, cioè sulla superficie del pezzo immerso da pulire. Il vantaggio principale del lavaggio ad ultrasuoni è che il diametro delle bolle di cavitazione è microscopico e quindi è possibile pulire efficacemente anche anfratti non raggiungibili da un tradizionale lavaggio con tensioattivi, come possono essere tagli o fori ciechi di piccolo diametro.

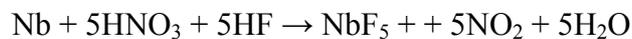
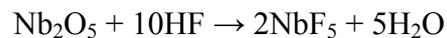
Trattamenti chimici

Dopo i lavaggi preliminari la cavità necessita di un processo di lucidatura per via chimica che porta la cavità ad avere le superfici con finitura a specchio. Il trattamento chimico (*chemical etching*) è necessariamente diverso nel caso del rame e del niobio a causa delle differenti reattività dei due metalli, ma il processo alla base è essenzialmente lo stesso, cioè l'attacco chimico con un'opportuna miscela di reagenti che avviene in maniera preferenziale sulle asperità presenti sulla superficie e quindi ne causa la riduzione della rugosità.

Le prove di pulizia chimica sono state effettuate sulle cavità a 14 GHz.

NIOBIO

Il niobio viene lucidato con una miscela di acido fluoridrico, nitrico e fosforico in parti uguali (miscela 1:1:1); l'acido fluoridrico reagisce con l'ossido superficiale del metallo dando prodotti solubili che vengono rimossi ed espongono la superficie metallica sottostante che è resistente all'attacco di questo acido. L'acido nitrico presente nella soluzione ossida il metallo formando uno strato superficiale che viene attaccato da HF e rimosso ulteriormente. In maniera semplificata la reazione è schematizzabile come segue:



La reazione è esotermica, come prodotti di reazione possono formarsi anche sub-ossidi del niobio, ma solo Nb_2O_5 è stabile.

L'acido fosforico agisce da moderatore, formando un film viscoso sopra le asperità del materiale che trattiene i prodotti di reazione e rallenta la cinetica del processo di *etching* che quindi è determinato dalla diffusione dei prodotti attraverso lo strato viscoso. Lo spessore del film viscoso è minore sopra le sporgenze della superficie e di conseguenza in queste zone la velocità di

Trattamenti

dissoluzione sarà maggiore che nelle valli, l'effetto globale è uno smussamento delle asperità e la conseguente lucidatura del pezzo.

Particolare cura deve essere posta nell'estrazione della cavità dal bagno di lucidatura: il film viscoso infatti aderisce alle pareti e trattiene gli acidi vicino alla superficie anche quando questa viene posta fuori dalla soluzione, la reazione pertanto prosegue in maniera non più controllata solo nelle zone ricoperte dal film viscoso deteriorando la qualità della lucidatura. È di fondamentale importanza perciò che il pezzo venga risciacquato abbondantemente con acqua deionizzata immediatamente dopo la sua estrazione dal bagno. La velocità di erosione della superficie del niobio è di circa $2 \mu\text{m}/\text{min}$.

La Figura 16 mostra la cavità 14 GHz in niobio lucidata chimicamente; si notano ancora sulla superficie dei graffi macroscopici dovuti a traumi esterni che sono troppo grandi per essere eliminati, ma la superficie è lucidata a specchio e microscopicamente liscia. I graffi sono comunque presenti solo sulle superfici esterne dove durante l'operazione non c'è campo elettromagnetico e quindi non è necessaria una finitura lucida, l'interno che è protetto dagli urti è invece efficacemente lucidato.



Figura 16: cavità 14 GHz dopo la pulizia chimica

RAME

Il trattamento chimico del rame si basa su una soluzione di acido sulfammico ($\text{N}_2\text{SO}_2\text{OH}$), citrato di ammonio ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7(\text{NH}_4)_3$) e butanolo ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$), (*SuBu*). La reazione deve avvenire a temperatura piuttosto elevata (72°C) e il pezzo immerso deve essere mantenuto sotto vigorosa agitazione per impedire la formazione di un film molto viscoso di butirrato che isola la superficie dal bagno impedendo la reazione del rame con la soluzione lucidante. Deve essere posta particolare attenzione anche alla temperatura della soluzione che non può avere uno scarto da quella nominale maggiore di 1°C , per questo motivo una volta aggiunti tutti i componenti previsti è necessario

Trattamenti

aspettare la termalizzazione del bagno prima di immerger il pezzo; l'agitazione è quindi fondamentale anche per avere una distribuzione uniforme di temperatura in tutto il volume del liquido. La velocità di erosione di questa soluzione è di $1.5 \mu\text{m}/\text{min}$.

Il pezzo, appena estratto dalla vasca va immerso in una soluzione passivante di acido sulfonico che forma sul rame un sottile strato di ossido necessario per preservare la finitura superficiale ottenuta attraverso la lucidatura chimica; anche nel caso del rame è poi fondamentale un prolungato risciacquo con abbondante acqua deionizzata per eliminare qualsiasi residuo di reagente dalla superficie della cavità.

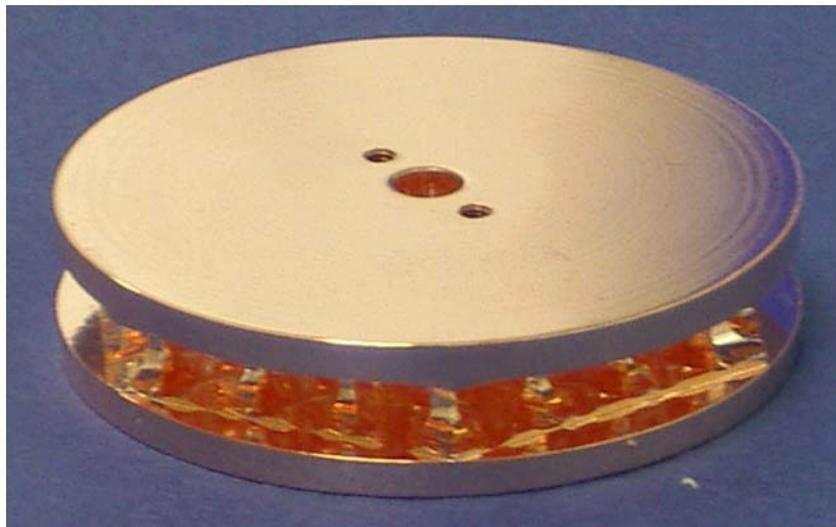


Figura 17: cavità 14 GHz in rame pulita chimicamente



Figura 18: interno della stessa cavità

Riepilogando, la cavità PBG prima di essere misurata subisce una serie di trattamenti volti a rendere la sua superficie il più possibile esente da contaminazioni di idrocarburi, priva di polvere e il meno rugosa possibile. In generale il processo che una cavità subisce dopo essere stata costruita consiste nelle seguenti fasi:

Trattamenti

1. trattamento di finitura meccanica (sgrossatura e prima lucidatura)
2. pulizia con solventi per rimuovere le tracce di olio da macchina e i residui di abrasivo
3. sgrassaggio ad ultrasuoni (lavaggio con detergente e risciacquo in acqua deionizzata)
4. trattamenti di pulizia chimica.

A seguito del processo di finitura superficiale, la cavità deve essere mantenuta in un ambiente pulito e privo di polvere per evitare in una sua contaminazione successiva al trattamento, ed è inoltre importante che non venga maneggiata a mani nude per non lasciare impronte di grasso corporeo che contribuirebbero a ridurre il vuoto limite raggiungibile.

Capitolo 4

Apparati da vuoto e criogenici

vengono descritti tutti gli apparati che permettono la creazione ed il mantenimento delle condizioni necessarie per la misura di una cavità PBG superconduttiva. Particolare attenzione al progetto del sistema di tenuta realizzato per la misura della cavità a 6 GHz.

Criostato

La misura di una cavità richiede tutta una serie di sistemi che possano mantenere le condizioni di ultra alto vuoto e di bassa temperatura richieste per operare ad alti campi in regime superconduttivo, cioè di un *criostato*.

Un criostato consiste essenzialmente in un contenitore isolato dall'esterno attraverso una serie di intercapedini in cui viene fatto il vuoto, al cui interno viene introdotto elio liquido in modo da portare la cavità alla temperatura di 4.2K o inferiore attraverso un opportuno pompaggio dell'elio gassoso che evapora dal recipiente. Il sistema è completato da un gruppo di pompaggio turbomolecolare + rotativa che serve per fare il vuoto in cavità.

La struttura tipica di un criostato è costituita – partendo dalla parte più interna – dalla zona in cui viene introdotto l'elio liquido che è a contatto con la cavità da raffreddare; un'intercapedine in cui viene fatto il vuoto per isolamento termico; un'intercapedine riempita di azoto liquido per il raffreddamento preliminare; un'intercapedine più esterna in vuoto. Per raffreddare si pompano le due intercapedini di isolamento, poi si inserisce l'azoto liquido e si porta la temperatura a 77K; a quel punto si introduce nell'intercapedine in vuoto più esterna dell'elio gassoso che permetta il raffreddamento anche del recipiente per l'elio liquido finché le pareti non termalizzano. A quel punto si pompa il gas di scambio termico e si procede con il trasferimento dell'elio liquido dal dewar. In questo modo si può portare la parte fredda del criostato a 4.2K evitando di consumare un'enorme quantità di elio per il raffreddamento del recipiente.

Per la misura della PBG si è pensato di adattare un criostato già presente nei Laboratori ed utilizzato per la misura di cavità a quarto d'onda; in questo criostato l'elio liquido introdotto attraverso la canna di transfer da una flangia superiore va a riempire un serbatoio che è dotato di una flangia inferiore da ultra alto vuoto a cui viene collegata la cavità per il raffreddamento. Il vuoto viene fatto in tutto il recipiente contenente la cavità attraverso una pompa turbomolecolare ed una

Apparati da vuoto e criogenici

rotativa collegate ad una flangia posta sul coperchio superiore. Questo setup è adatto per il raffreddamento della PBG che, essendo una struttura aperta, pone problemi nel suo pompaggio.

In Figura 19 si vede l'inserto del criostato usato per le misure a freddo: si nota il piatto superiore di chiusura da cui scendono le connessioni per il vuoto, i cavi per il trasporto dei segnali a radiofrequenza e dei termometri e la linea per l'elio liquido. Nell'area riquadrata è evidenziato il serbatoio dell'elio liquido che è costruito in acciaio inox AISI 316L; i fogli di rame che lo ricoprono servono per ancoraggio termico di tutto il sistema. Al di sotto del serbatoio viene flangiato la cavità da misurare e tutto l'inserto viene introdotto all'interno del criostato che si vede nella parte bassa della figura. Completano il sistema le linee per l'azoto liquido che raffreddano preliminarmente un'intercapedine nel criostato e le linee per il pompaggio delle intercapedini che isolano termicamente la zona fredda dall'esterno.



Figura 19: criostato utilizzato per la misura della PBG

Progetto del sistema di tenuta e raffreddamento della cavità

La struttura aperta di una cavità PBG presenta notevoli problemi dal punto di vista della sua messa in vuoto e del suo raffreddamento con elio liquido, infatti non è possibile procedere come con le cavità tradizionali di tipo *pillbox* che vengono evacuate all'interno e sono immerse

Apparati da vuoto e criogenici

direttamente nel bagno di elio. Per questa cavità è stato quindi necessario adattare il criostato solitamente utilizzato presso i Laboratori per misurare i risonatori a quarto d'onda (QWR – *Quarter Wave Resonator*) impiegati nell'acceleratore ALPI; queste cavità sono formate da un tubo cilindrico aperto a un'estremità con una barra anch'essa cilindrica coassiale ad esso. La barra centrale è cava ed al suo interno fluisce elio liquido di raffreddamento che proviene da un serbatoio superiore flangiato alla cavità stessa. La struttura è parzialmente aperta e quindi la sua evacuazione viene effettuata tutto lo spazio attorno ad essa, mentre il raffreddamento è assicurato dall'elio liquido proveniente dal serbatoio superiore.

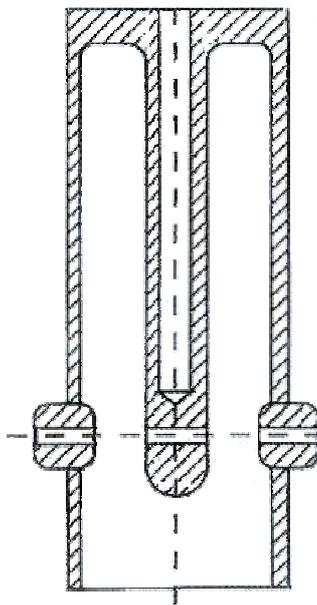


Figura 20: sezione di una cavità a quarto d'onda, si nota il canale centrale per l'elio di raffreddamento

Nella Figura 20 è rappresentata la sezione longitudinale di un QWR, si nota come la struttura sia aperta nella parte inferiore e sulle *beam ports* e si vede il canale centrale per il raffreddamento che è flangiato alle restanti parti del criostato (non mostrate).

Nel caso della cavità PBG è stato realizzato un sistema di tenuta per il vuoto e di raffreddamento costituito da un secondo serbatoio cilindrico per l'elio raccordato a quello già esistente sul criostato da una flangia per ultra alto vuoto CF 35 e fissato a tenuta sul piatto superiore della PBG attraverso una guarnizione a filo di indio e due mezzelune poste sulla parte inferiore del piatto e avvitate al resto del serbatoio per assicurare la tenuta da vuoto.

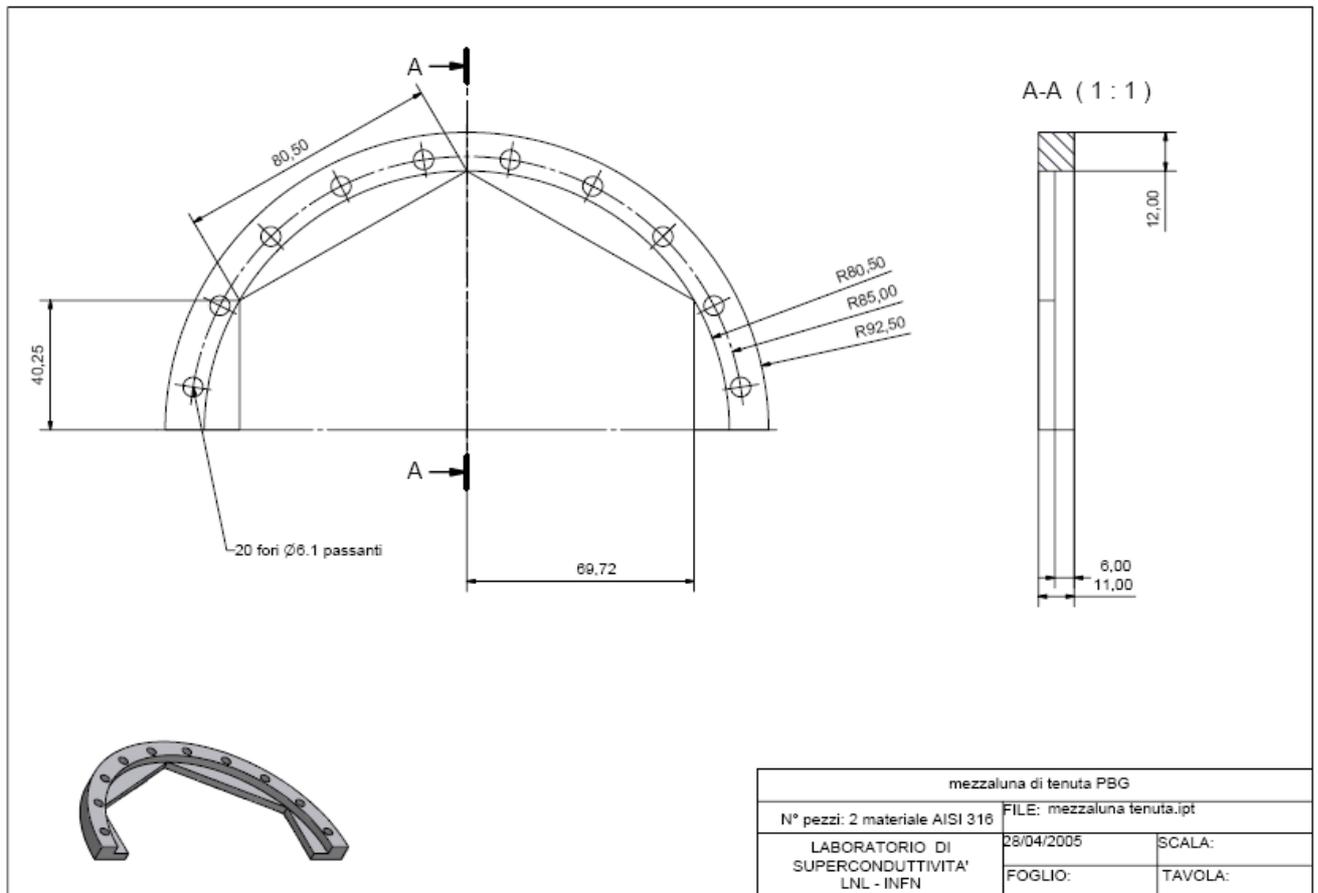


Figura 21: progetto delle mezzelune di fissaggio per la tenuta di elio

Nella Figura 21 è mostrato il progetto delle mezzelune che assicurano il fissaggio a tenuta della cavità sul serbatoio di elio, le due mezzelune vanno in battuta sulla parte inferiore del piatto della PBG e si avvitano sulla flangia del serbatoio stesso, che è mostrato in Figura 22. l'interno del serbatoio viene riempito di elio liquido attraverso la flangia CF 35 superiore, mentre l'esterno è in vuoto; la parte inferiore del serbatoio viene chiusa ermeticamente dal piatto della cavità che è munito di forellini per il raffreddamento anche delle colonnine. La guarnizione è costituita da un filo di indio che viene alloggiato nell'apposita cava a sezione triangolare praticata sulla flangia del serbatoio e che, compresso dal serraggio dei bulloni, deborda dal volume della cava riempiendo la luce tra piatto della PBG e flangia del serbatoio in modo da impedire fughe di elio verso il vuoto.

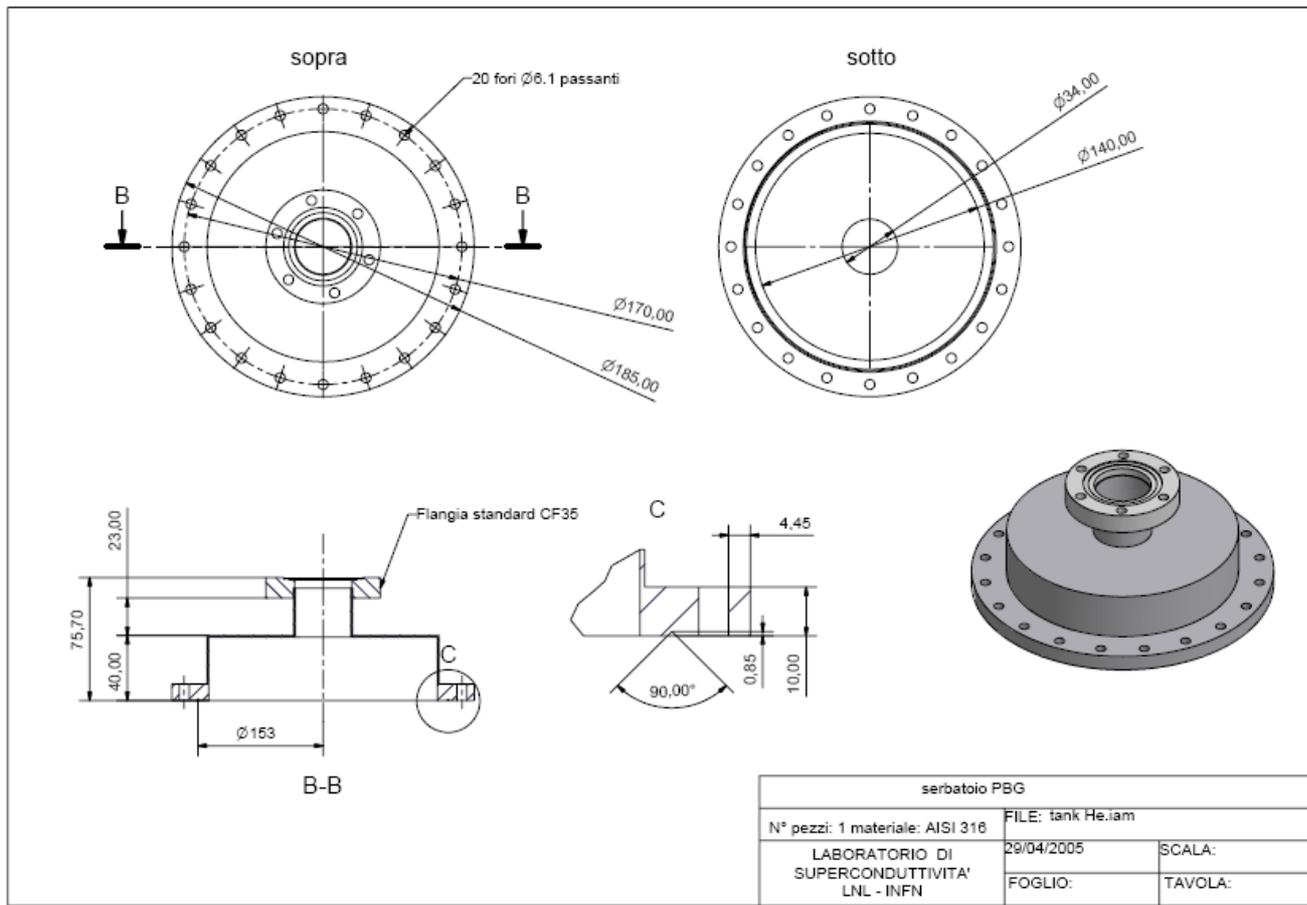


Figura 22: progetto del serbatoio per l'elio a tenuta

Il sistema cavità + serbatoio viene quindi avvitato al resto del criostato attraverso la flangia superiore.

Le due figure seguenti sono la rappresentazione tridimensionale dell'assieme cavità e serbatoio; si nota come la cavità faccia da chiusura per l'elio e sia bloccata al serbatoio dalle due mezzelune di fissaggio. La flangia superiore permette il passaggio del liquido di raffreddamento, mentre la parte esterna del sistema è in vuoto. Le antenne per l'accoppiamento (non mostrate in figura) sono fissate lateralmente alla cavità.

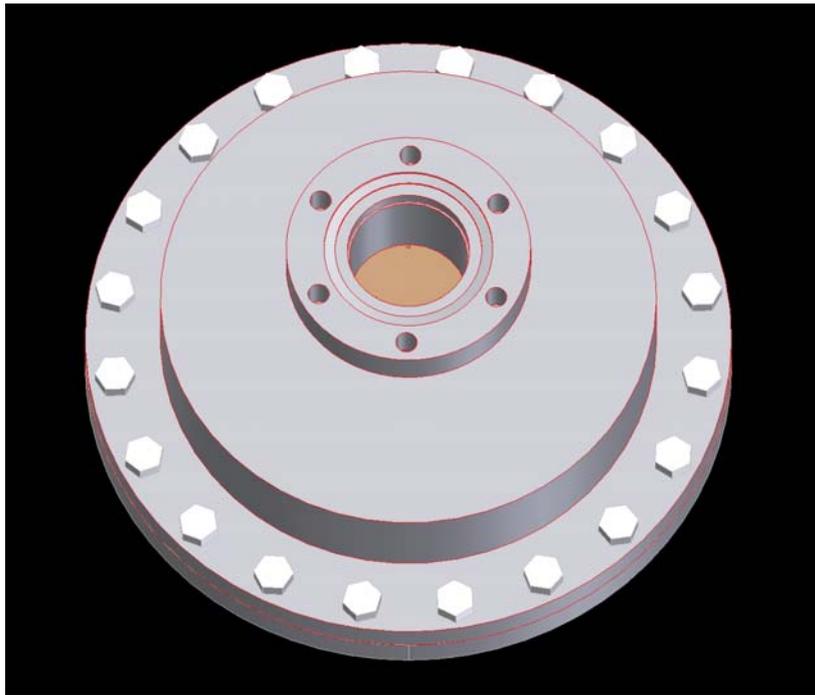


Figura 23: vista superiore dell'assieme cavità + serbatoio

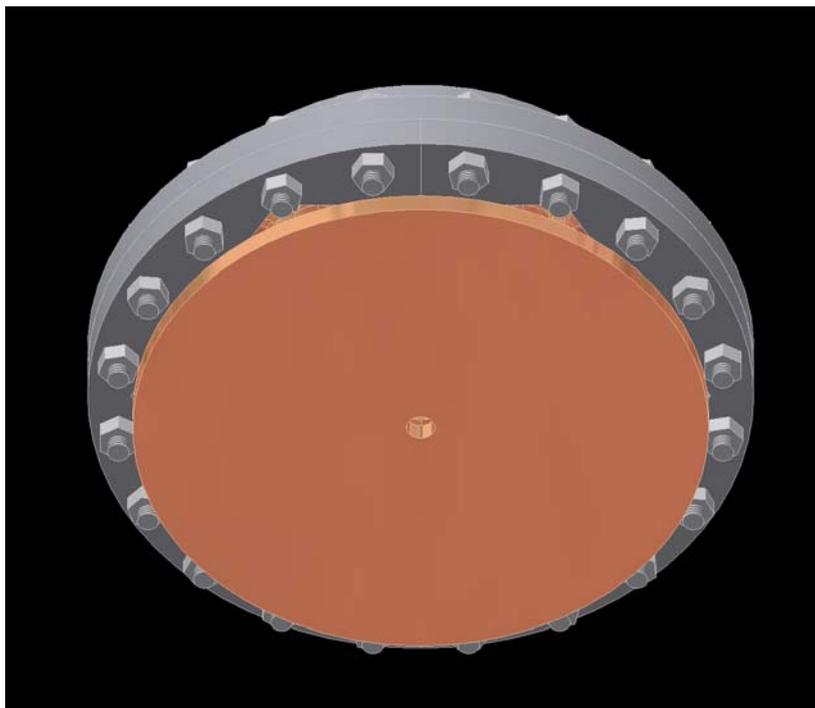


Figura 24: vista inferiore dell'assieme cavità + serbatoio

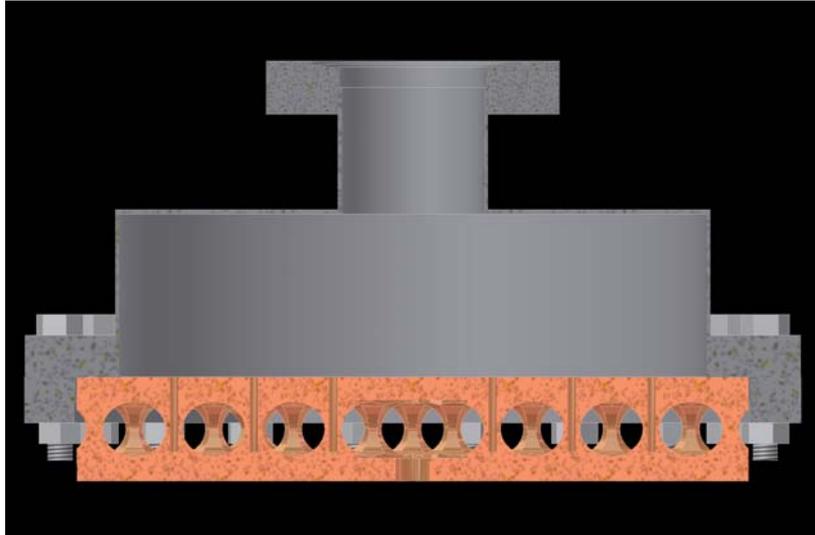


Figura 25: sezione longitudinale dell'assieme cavità + serbatoio

La Figura 25 è una sezione longitudinale del serbatoio a cui è fissata la cavità. Si nota che il piatto della cavità chiude il serbatoio sul fondo assicurando la tenuta per l'elio e per il vuoto esterno; lateralmente (non mostrate in figura) vanno fissate le antenne per l'accoppiamento della radiofrequenza con la cavità. Il sistema è così concepito per permettere la maggiore libertà possibile nel posizionamento delle antenne e per consentire il raffreddamento nel modo più semplice ed efficiente possibile. Il niobio ha una conducibilità termica piuttosto bassa ($54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a 300 K e $100 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a 4K) rispetto al rame ($400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a 300K e $>10^4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a 4K)^{9,10} quindi è importante che il raffreddamento sia efficace su tutta la cavità per evitare disuniformità della temperatura; perciò è previsto che sul piatto inferiore della cavità, - cioè quello non a diretto contatto con il bagno di elio - siano montati dei termometri che permettano di monitorare l'effettivo raggiungimento della temperatura operativa su tutto il volume del risonatore.

Nel caso di una reale operazione in un acceleratore il sistema andrà necessariamente riveduto a causa della necessità di avere spazio libero per il passaggio del fascio attraverso i due piatti della PBG.

Capitolo 5 Misure in Radiofrequenza

In questo capitolo viene data una breve descrizione dei principi di misura di una cavità e viene descritto il sistema di misura utilizzato. Sono poi presentati i risultati ottenuti dal test in RF delle cavità PBG a 6 GHz.

Principi per la misura di una cavità risonante

La misura di una cavità consiste nel determinare il valore del fattore di merito Q in funzione del campo accelerante E_{acc} cioè nella misura del fattore di merito in funzione del contenuto di energia immagazzinato dalla cavità stessa.

Per eccitare il modo risonante si immette un segnale a radiofrequenza da un'antenna detta **coupler**, in tal modo si carica di energia elettromagnetica il risonatore e lo si mantiene in questo stato fintanto che l'antenna continua a trasmettere. Una seconda antenna, detta **pickup**, preleva una minima porzione dell'energia immessa in modo da monitorare il livello di risonanza senza perturbare i campi presenti nella cavità; la posizione di questa antenna deve essere tale da non ricevere direttamente il segnale trasmesso dal **coupler**, ossia non si devono posizionare le due antenne troppo vicine per evitare il fenomeno del **cross talking**. Sulla porta di ingresso è presente un disaccoppiatore bidirezionale che separa la potenza riflessa (P_{ref}) da quella incidente nella cavità (P_i); un sensore di potenza con un intervallo tra 0.01 e 100 mW misura la potenza trasmessa al **coupler** (P_{cpl}), la riflessa e quella prelevata dal **pickup** (P_{pk}). La Figura 26 schematizza il sistema di accoppiamento del segnale in radiofrequenza alla cavità, è visibile il disaccoppiatore che permette di misurare separatamente la potenza riflessa e quella trasmessa al **coupler**; l'antenna sulla destra funge da **pickup** e ad essa è collegato il sensore di potenza per la misura di P_{pk} .

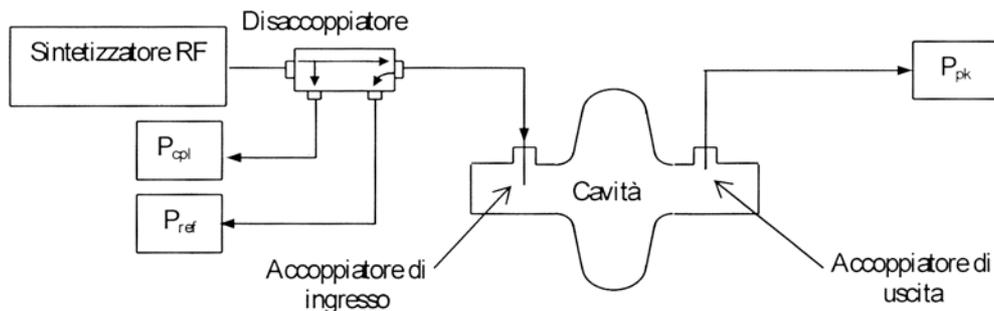


Figura 26: rappresentazione del sistema di accoppiamento del segnale RF ad una cavità³

Misure in Radiofrequenza

Il sistema costituito dal generatore e dalla cavità accoppiata mediante un'antenna è schematizzabile secondo il circuito equivalente di Figura 27; l'alimentatore RF possiede una sua resistenza interna ed è collegato all'accoppiatore tramite una linea di trasmissione dotata di un'impedenza caratteristica. L'accoppiatore è rappresentato come un trasformatore e permette di adattare la linea di trasmissione ad un carico di impedenza arbitraria; la cavità è rappresentata dal circuito risonante RLC parallelo.

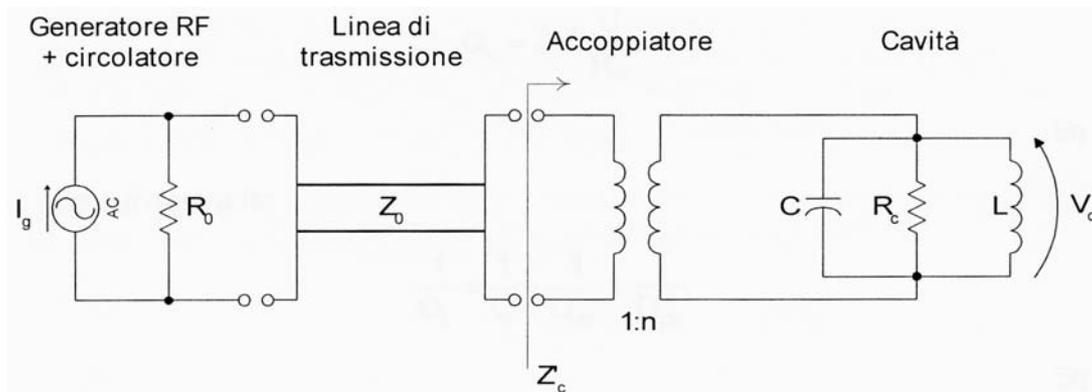


Figura 27: circuito equivalente di alimentatore + accoppiatore + cavità (adattato da *ref¹¹*)

Durante la misura, la potenza del segnale RF in ingresso viene modulata con un involuppo rettangolare; la durata dell'impulso deve essere tale da riempire completamente di energia la cavità.

Esistono due diversi regimi di funzionamento: nel primo l'alimentatore è attivo e la cavità si carica di energia elettromagnetica fino a raggiungere il suo valore massimo che dipende dalla potenza dissipata; successivamente il generatore è spento e la potenza immagazzinata dal risonatore viene rilasciata alla linea tramite gli accoppiatori.

La potenza totale dissipata è data dalla somma: $P_{tot} = P_d + P_e + P_{pk}$ con P_d potenza dissipata dalle pareti e P_e P_{pk} potenze trasmesse alle linee di ingresso e uscita che dipendono dalla lunghezza efficace delle antenne.

In queste condizioni il fattore di merito *a carico* della cavità è definito come:

$$Q_L = 2\pi f \frac{U}{P_{tot}} \quad \text{Eq. 5-1}$$

Esplicitando nell'equazione l'espressione per la potenza e riarrangiando si ottiene:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q} + \frac{1}{Q_{cpl}} + \frac{1}{Q_{pk}} \quad \text{Eq. 5-2}$$

$$Q_i = 2\pi f \frac{U}{P_i}$$

Per ogni antenna si definisce un parametro, detto *coefficiente di accoppiamento*:

Misure in Radiofrequenza

$$\beta_i = \frac{Q}{Q_i} = \frac{P_i}{P_d} \quad \text{Eq. 5-3}$$

Le antenne sono dimensionate in modo che $\beta_{pk} \ll 1$ per non perturbare i campi nella cavità e $\beta_{cpl} = 1$ in modo da alimentare la cavità solo con l'energia necessaria per impedire lo smorzamento (**accoppiamento critico**).

In queste condizioni la potenza in ingresso equivale alla potenza dissipata sulle pareti, vale a dire:

$$P_e = P_{cpl} - P_{ref} = P_d \quad \text{Eq. 5-4}$$

Il segnale riflesso tende verso zero man mano che si raggiunge l'equilibrio e la cavità risulta essere un carico adattato alla linea di trasmissione.

Quando l'alimentazione viene interrotta la cavità si scarica con un andamento temporale del tipo:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U}{\tau_L} = -P_{tot} \quad \text{Eq. 5-5}$$

Un *peak power analyzer*, cioè un misuratore di potenza risolto nel tempo, misura il segnale ad una delle due antenne che è proporzionale ad U; da qui si può risalire al valore della costante di tempo per il decadimento e misurare il fattore di merito a carico attraverso:

$$Q_L = 2\pi f \cdot \tau_L \quad \text{Eq. 5-6}$$

Sostituendo i coefficienti di accoppiamento nell'Eq. 5-2, si può esprimere il Q della cavità come:

$$Q = (1 + \beta_{cpl} + \beta_{pk}) Q_L = 2Q_L \quad \text{Eq. 5-7}$$

L'ultimo passaggio è giustificato dal fatto che si è in accoppiamento critico ($\beta_{cpl} = 1$) e che l'antenna del *pickup* non deve prelevare troppo segnale ($\beta_{pk} \ll 1$).

La misura viene effettuata in due fasi:

inizialmente si lavora a bassi valori di campo accelerante e si misurano P_{cpl} , P_{ref} , P_{pk} e τ_L per calcolare Q_L , Q_{pk} e di conseguenza anche il Q della cavità.

Nella seconda fase si aumenta il livello di energia all'interno della cavità e si misurano Q_0 ed E_{acc} sfruttando il fatto che il Q del *pickup* è costante.

$$Q_0 = \frac{Q_{pk} P_{pk}}{P_d}$$

Eq. 5-8

$$E_{acc} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{r}{Q} Q_{pk} P_{pk}}$$

In questo modo si può aumentare la quantità di energia immagazzinata fino ai limiti del risonatore e misurarne il fattore di merito.

Sistema di misura RF

Il sistema di misura RF è controllato da computer e garantisce l'alimentazione della cavità con il segnale ed il suo prelievo attraverso il *pickup* per effettuare la misura.

La cavità è alimentata dalla porta del *coupler* da un segnale la cui frequenza è impostata da un *frequency generator*; il segnale prodotto viene inviato ad un **RF switch** che funziona come interruttore a radiofrequenza per l'alimentazione impulsata. Il segnale in uscita viene attenuato da un *attenuatore programmabile* e successivamente mandato *all'amplificatore di potenza* in grado di fornire 50 W a 6 GHz. All'ingresso della cavità è presente un disaccoppiatore bidirezionale che separa la potenza riflessa e quella incidente, che vengono misurate rispettivamente da un *peak power sensor* e da un *power sensor*. Il tempo di decadimento viene misurato attraverso un *peak power analyzer*.

La frequenza di risonanza di una cavità non è costante ma varia a causa di vibrazioni meccaniche, dilatazioni termiche e deformazioni dovute alle forze elettriche generate dai campi presenti; per mantenersi in condizioni di risonanza è quindi necessario utilizzare un circuito retroazionato (**Phase Lock Loop**) che segua la frequenza di risonanza durante la misura. Componente fondamentale di tale circuito è costituito dal rivelatore di fase.

La cavità collegata alle antenne si comporta come un circuito RLC che causa uno sfasamento tra il segnale in ingresso e quello in uscita; tale sfasamento viene misurato attraverso un *rivelatore di fase*, costruito attraverso un moltiplicatore dei due segnali ed un filtro passa basso che taglia la componente in alta frequenza restituendo un segnale continuo proporzionale allo sfasamento tra la porta di entrata e quella di uscita³. (vedi Figura 28).

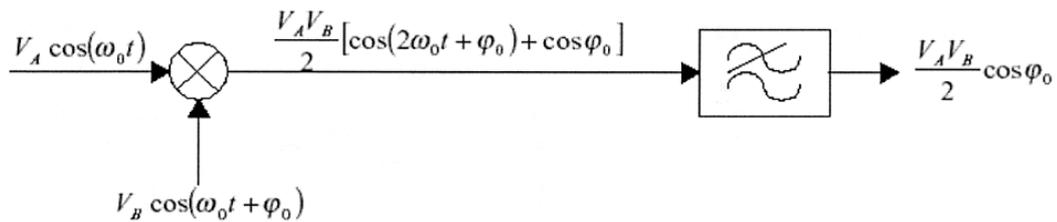


Figura 28: schema a blocchi del rivelatore di fase

Scopo delle misure

La misura di una cavità consiste nella determinazione dei suoi parametri fondamentali di funzionamento, in particolare sono di interesse la sua frequenza di risonanza ed il fattore di merito in funzione del campo accelerante. Le strutture PBG, sono risonatori di tipo innovativo e la procedura di test a cui devono essere sottoposte non è ancora standardizzata come nel caso delle cavità solitamente misurate presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

La misura di una cavità è solitamente divisa in due fasi:

una prima fase a temperatura ambiente, in cui viene effettuata la calibrazione delle antenne e vengono misurati il Q a caldo e la frequenza di risonanza.

Una fase a temperatura criogenica in cui si misura il Q a freddo e l'andamento di Q in funzione del campo elettrico accelerante.

In questo lavoro di tesi è stata effettuata la misura delle cavità a 6 GHz, la cui frequenza di risonanza cade all'interno del campo di lavoro degli amplificatori di potenza in dotazione al Laboratorio.

La serie di test effettuati sulla cavità PBG mirava a determinare:

- la frequenza di risonanza;
- la monodalità, ossia l'assenza di modi risonanti di ordine superiore;
- il Q a caldo.

In aggiunta, è stata effettuata una misura della frequenza di risonanza introducendo nella struttura, oltre alle antenne, un *tuner* metallico. È previsto poi il test della cavità a freddo, utilizzando il sistema di tenuta realizzato appositamente.

Accoppiamento delle antenne alla cavità PBG

Come visto in precedenza, la misura dei parametri di una cavità viene effettuata quando si è in condizioni di accoppiamento critico, ossia quando il *coupler* fornisce alla cavità solo la potenza necessaria per caricare il risonatore; il *pickup* inoltre deve essere dimensionato in modo da prelevare

Misure in Radiofrequenza

un segnale sufficientemente elevato da poter essere misurato ma non così grande da perturbare la configurazione dei campi che si instaura. Questa ultima condizione non è comunque così stringente per le cavità PBG, infatti la differenza con le cavità tradizionali è l'assenza, nelle cavità su PBG, di fori di accoppiamento in corrispondenza dell'apertura delle antenne. Nelle cavità tradizionali l'accoppiamento con le antenne causa un *down-shift* di frequenza del 2%: tale effetto è assente nelle cavità su PBG a causa del fenomeno dell'accoppiamento distribuito nella cavità. Infatti i campi sono confinati dai primi anelli di colonne più vicini al difetto e tali colonne non sono disturbate allo scopo di ottenere l'accoppiamento; quindi quest'ultimo non causa variazioni nella distribuzione di campo che conserva il suo andamento originale. Un'ultima considerazione da fare è che *coupler* e *pickup* non devono essere troppo vicini da trasmettersi vicendevolmente il segnale senza eccitare il modo risonante.

Essenzialmente l'accoppiamento con il modo risonante può essere effettuato in due modi: con il campo elettrico, attraverso un'antenna coassiale, oppure con un anello che intersechi il flusso del campo magnetico. Nella PBG il campo elettrico è diretto lungo la direzione dell'asse dei cilindretti, mentre le linee di campo magnetico descrivono delle orbite attorno al difetto (modo TM), come mostrato in Figura 29 e Figura 30.

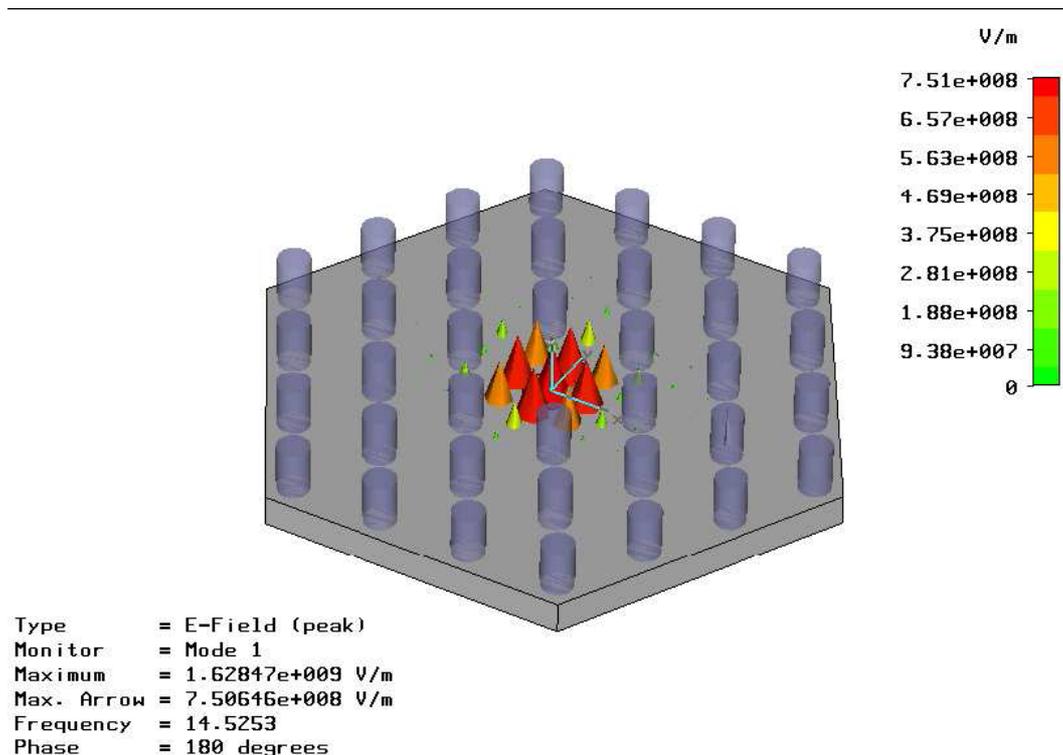


Figura 29: distribuzione del campo elettrico nella PBG.

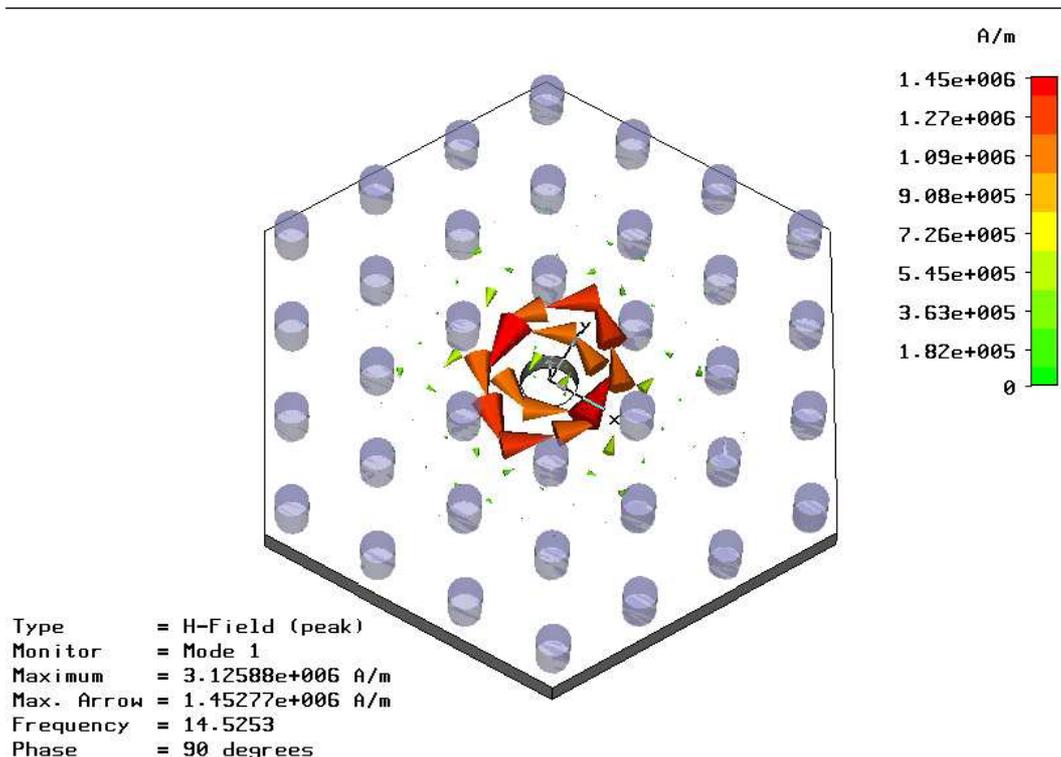


Figura 30: distribuzione del campo magnetico nella cavità PBG.

A causa della struttura della cavità e del sistema criogenico, l'accoppiamento elettrico attraverso la *beam port* non è possibile ed è comunque sconsigliabile perché l'esigua distanza fra i piatti rende altamente probabile il *cross talking* e la posizione delle antenne nella zona di campo massimo porta ad una tendenza al sovraccoppiamento; sono stati perciò studiati altri tipi di accoppiamento, sia con il campo elettrico che con quello magnetico.

Si è progettato un accoppiamento completamente magnetico, costruendo due piccoli avvolgimenti in rame che entrassero in cavità lateralmente nello spazio tra le colonnine, ma questa configurazione non si è rivelata molto efficiente, perché anche posizionando i due loop in prossimità del modo di difetto il segnale trasmesso e quello prelevato erano molto bassi e non si riusciva ad ottenere un picco negativo nella potenza riflessa sufficientemente alto e stretto per poter misurare accuratamente la frequenza di risonanza.

Si è allora passati ad un accoppiamento con il campo elettrico, utilizzando due antenne di rame (diametro 1mm) sagomate ad "L" in modo che la direzione dell'antenna coincidesse con quella delle linee di forza, ed inserite nella cavità lateralmente; le due antenne sono state posizionate a 180° l'una rispetto all'altra. Questa configurazione ha dato risultati migliori e si sono ottenuti segnali sufficientemente buoni per la misura.

Un'altra configurazione testata (sempre in accoppiamento con il campo elettrico) è quella con il *coupler* entrante dalla *beam port* ed il *pickup* posizionato lateralmente al risonatore. Questa geometria è quella usata per tutte le misure a caldo effettuate perché più semplice da realizzare.

Misure in Radiofrequenza

Sono poi stati provati anche accoppiamenti misti elettrico – magnetico con un *pickup* a loop e l'antenna per trasmettere la potenza accoppiata al campo elettrico.

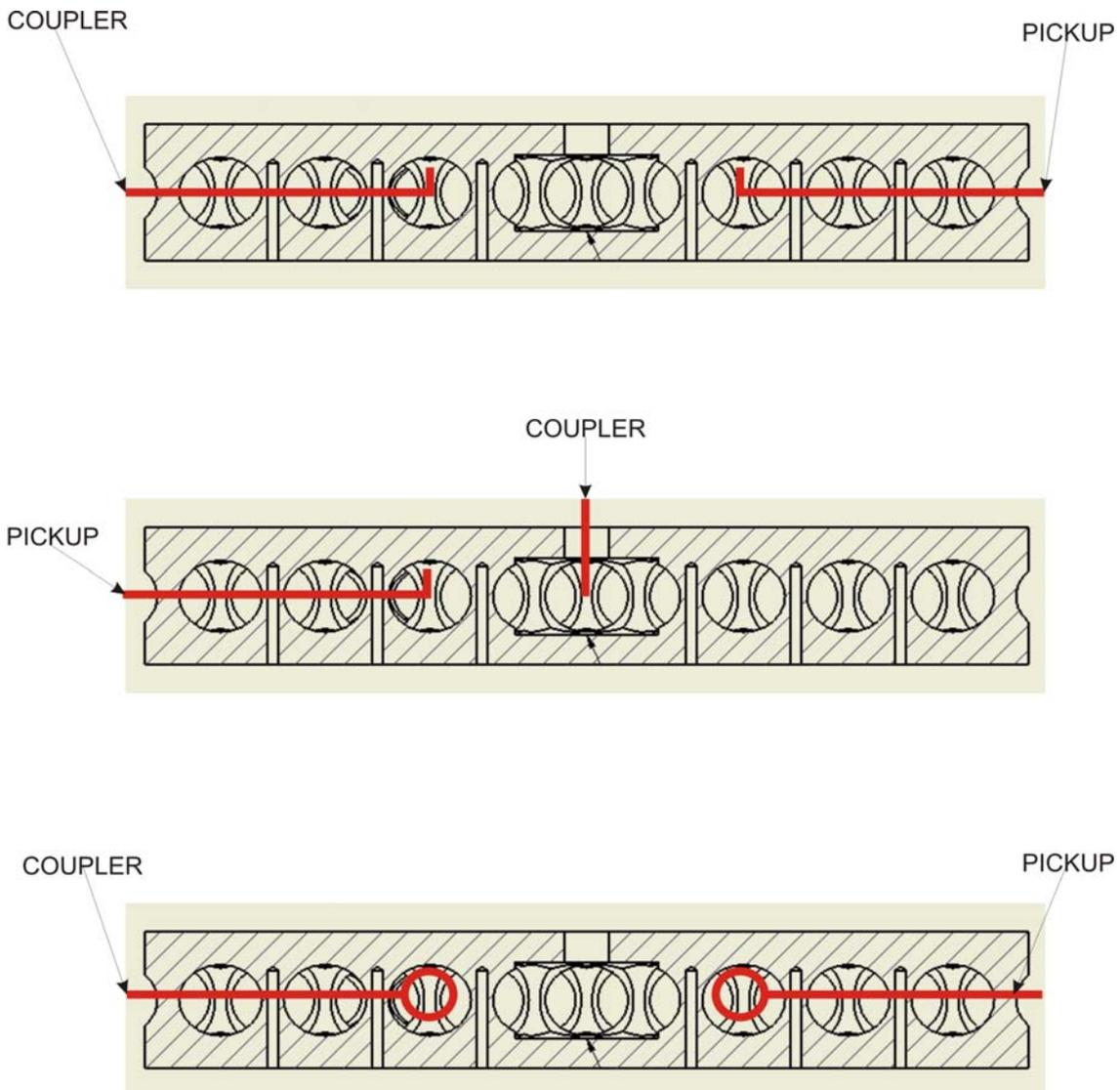


Figura 31: schema degli accoppiamenti testati: elettrico dai lati (in alto), elettrico con il coupler dalla *beam port* (al centro) e magnetico laterale (in basso).

Figura 31 mostra lo schema delle geometrie di accoppiamento provate per la misura, mentre la Figura 32 fa vedere la cavità in rame con un coupler di prova fissato alla *beam port*, l'antenna viene inserita per una breve escursione perché la zona centrale è quella del difetto e il segnale dell'antenna eccita direttamente il modo di risonanza.

È da notare che qualunque fosse la configurazione utilizzata è sempre stato necessario portare le estremità delle antenne a ridosso del difetto, a testimonianza che la struttura periodica della PBG è estremamente efficace nel confinare il campo nei pressi del difetto e che – almeno a caldo quando il risonatore non è in stato superconduttivo – 4 serie di colonnine sono sufficienti per il confinamento.

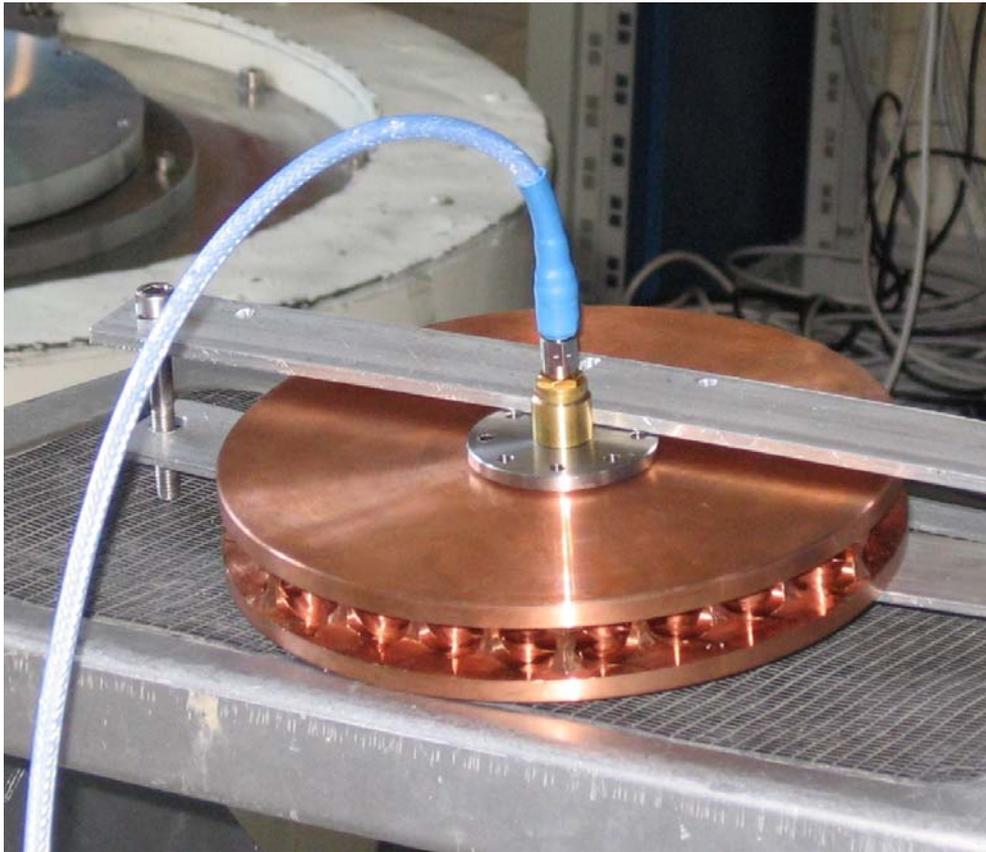


Figura 32: prova di accoppiamento elettrico sulla PBG in rame.

Misura della frequenza di risonanza

La frequenza di risonanza delle cavità è stata misurata posizionando il *coupler* centralmente nel foro della *beam port* e fissando un *pickup* di tipo elettrico lateralmente alla cavità. Dato il forte confinamento del campo in prossimità del difetto, l'antenna che preleva il segnale deve essere piuttosto lunga ed avvicinarsi molto al centro della cavità per prelevare abbastanza potenza. La frequenza è stata determinata alimentando la cavità dal *coupler* e misurando la posizione del minimo di potenza riflessa. I valori ottenuti sono elencati in tabella.

Tabella 4: frequenze di risonanza per le diverse cavità misurate.

<i>Cavità</i>	<i>Frequenza di risonanza (MHz)</i>
Rame 4 serie di colonne	5835
Rame 4 serie di colonne pallinata	5965
Niobio 4 serie di colonne non lavata	5858
Niobio 4 serie di colonne lavata	5911

Misure in Radiofrequenza

Si può vedere come la frequenza di risonanza vari a seconda del materiale usato e del livello di pulizia e come i trattamenti superficiali ne determinino la variazione. In particolare è interessante osservare come la frequenza sia modificata quando la stessa cavità viene pulita dai residui di lavorazione.

I grafici seguenti mostrano lo spettro di trasmissione delle cavità misurate, cioè la potenza riflessa al *coupler* e quella trasmessa al *pickup* in funzione della frequenza; si vede chiaramente il modo risonante come una rapida diminuzione della potenza riflessa ed un corrispondente aumento di quella prelevata dal *pickup* – cioè la potenza trasmessa. Si nota poi che la cavità è monomodale nel range di misura, vale a dire non ci sono altri picchi di risonanza di ordine superiore, cosa che ci si aspettava e che rappresenta essenzialmente la ragione per costruire questo tipo di cavità.

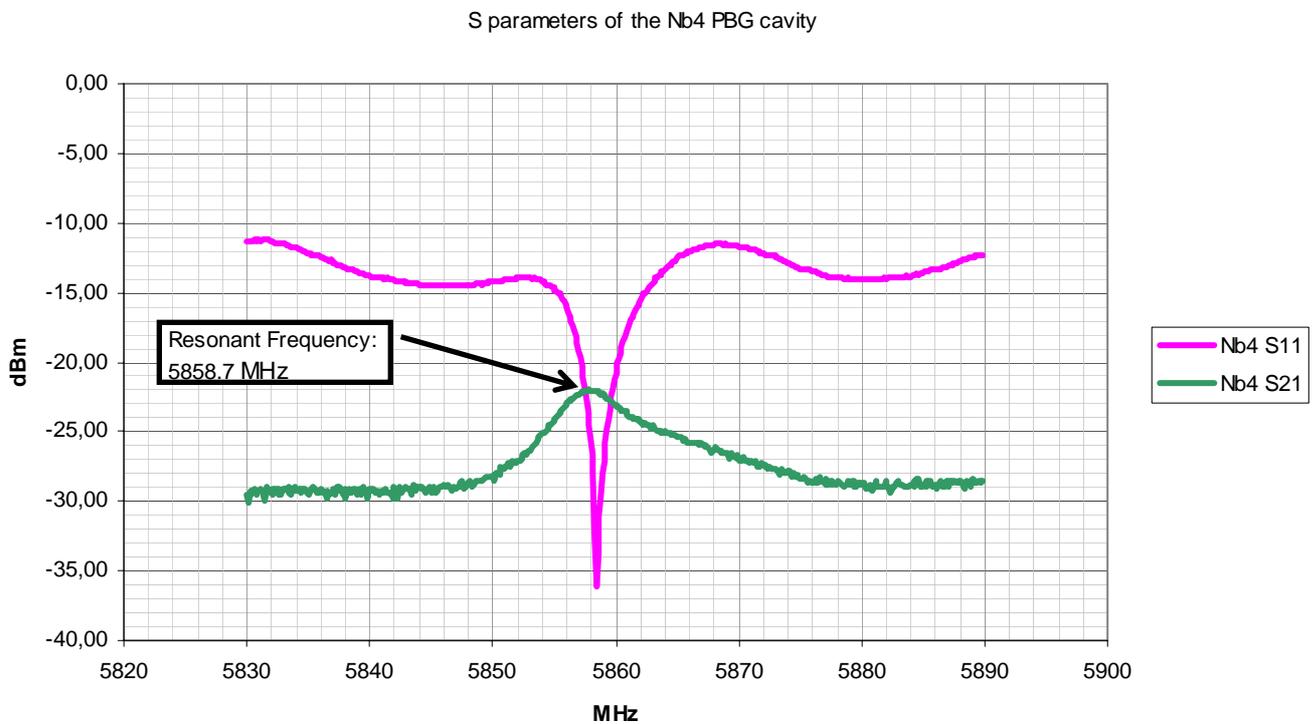


Figura 33: frequenza di risonanza della cavità in niobio (s11: potenza riflessa, s21: potenza trasmessa).

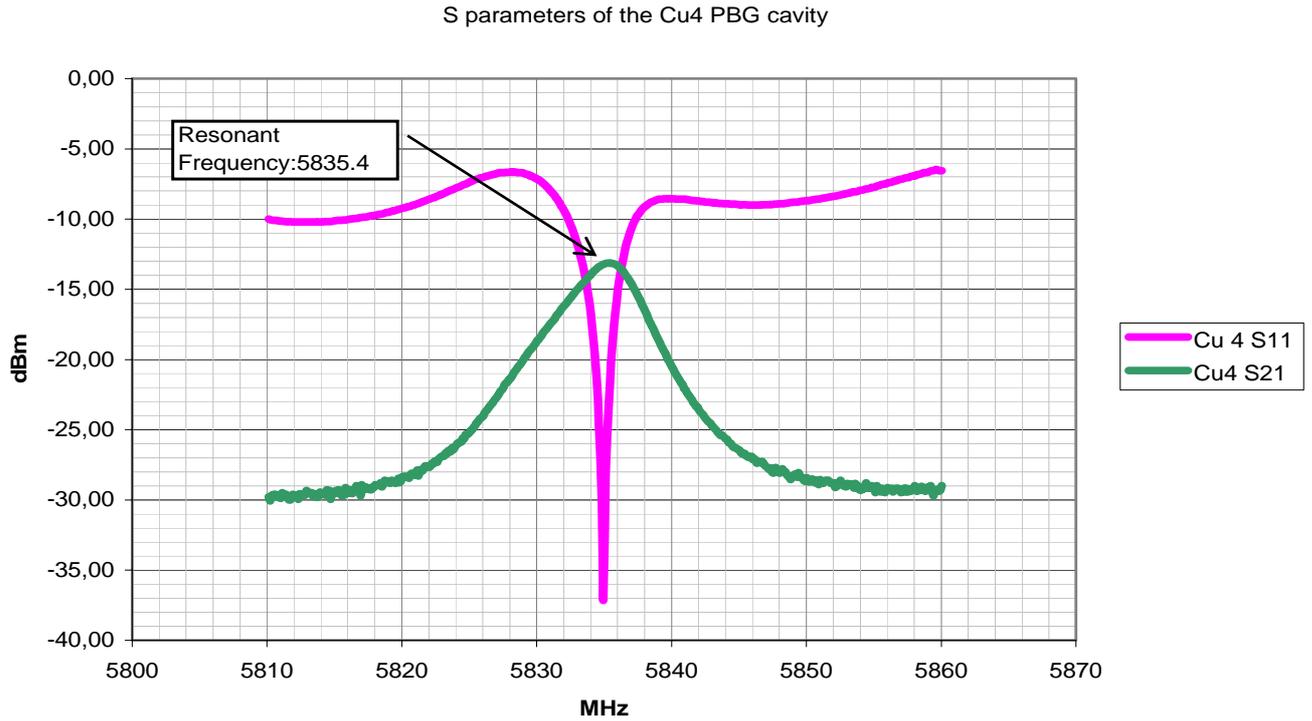


Figura 34: frequenza di risonanza della cavità in rame (s11: potenza riflessa, s21: potenza trasmessa).

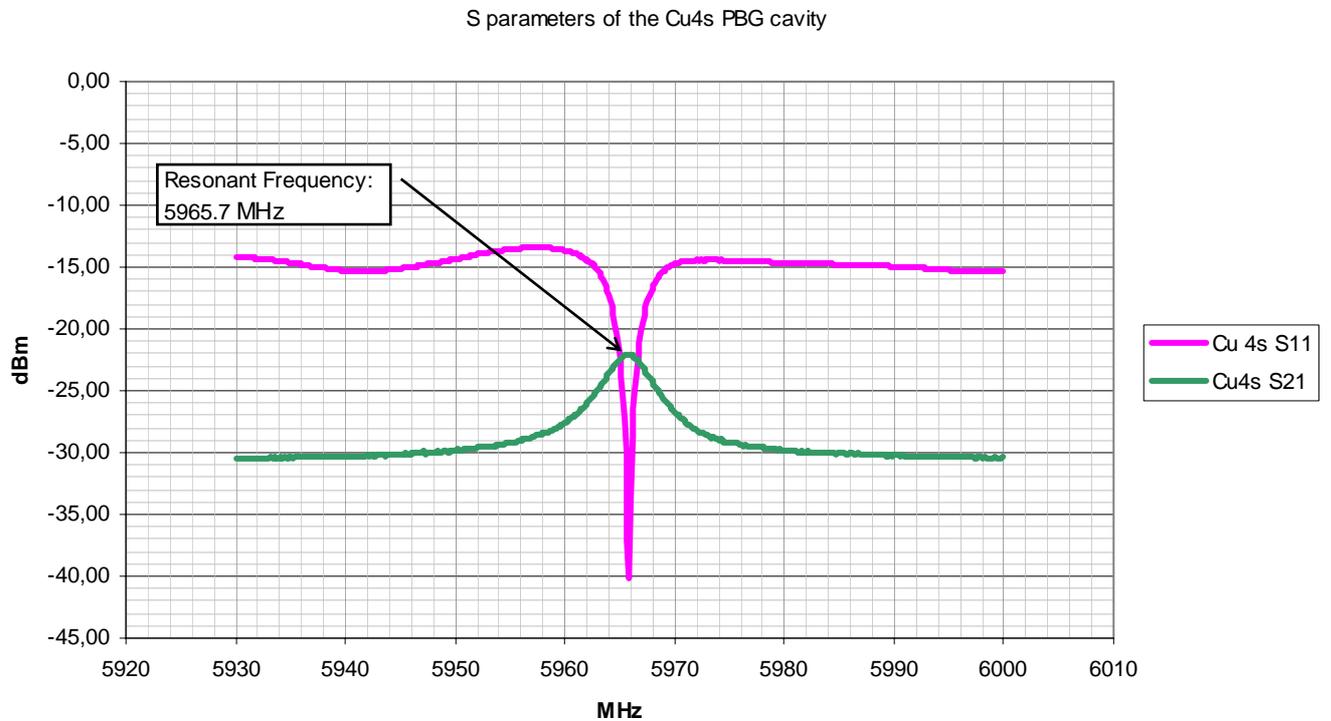


Figura 35: frequenza di risonanza della cavità in rame pallinata (s11: potenza riflessa, s21: potenza trasmessa).

Misura del Q a caldo

Il fattore di merito a bassi campi delle cavità realizzate è stato misurato determinando la costante di tempo τ_L , l'accoppiamento utilizzato era di tipo elettrico, con il *coupler* sulla *beam port*.

I risultati sono elencati in Tabella 5.

Tabella 5: Q delle cavità PBG realizzate.

<i>Cavità</i>	<i>Fattore di merito</i>	<i>Tempo di decadimento (s)</i>
Rame 4 serie di colonne	5.50×10^5	7.50×10^{-6}
Rame 4 serie di colonne pallinata	3.60×10^4	4.80×10^{-7}
Niobio 4 serie di colonne non lavata	3.77×10^4	5.11×10^{-7}
Niobio 4 serie di colonne lavata	4.11×10^4	

Il Q a caldo è maggiore nelle cavità in rame perché la sua conducibilità elettrica è maggiore e quindi le perdite resistite sono più basse, nel caso del niobio ci si aspetta un aumento del Q di almeno 5 ordini di grandezza quando la PBG opera alla temperatura dell'elio liquido, poiché la bassissima resistività residua del niobio al di sotto della temperatura di transizione permette l'instaurarsi di campi molto elevati con una dissipazione molto bassa.

Si nota inoltre come i trattamenti superficiali influiscano sulle prestazioni della cavità anche quando questa è a temperatura ambiente, infatti c'è una forte diminuzione del Q nella PBG di rame pallinata, la cui superficie è fortemente deteriorata dal trattamento meccanico che ha subito. Questo effetto è visibile anche nel niobio, la stessa cavità incrementa il suo fattore di merito una volta che vengono rimossi i contaminanti dalla sua superficie attraverso il lavaggio. I trattamenti di lucidatura e pulizia della superficie di una cavità superconduttiva sono quindi fondamentali se si vuole raggiungere fattori di merito di 10^{10} nell'operazione a temperatura criogenica.

Tuning della cavità

L'introduzione di un corpo all'interno della cavità ne modifica la frequenza di risonanza; questo fenomeno può essere utilizzato per misurare la distribuzione dei campi oppure per accordare il risonatore alla frequenza desiderata.

Misure in Radiofrequenza

Si è realizzato un semplice sistema di accordatura della cavità PBG introducendo lateralmente nello spazio fra le colonnine, un'astina di rame (diametro 2 mm) collegata ad un passante lineare micrometrico per misurarne la posizione. Inizialmente l'astina era inserita completamente nella cavità in modo che la sua estremità fosse in prossimità del centro, poi la si è spostata ad intervalli di 2.5 mm verso l'esterno misurando la frequenza di risonanza in ogni posizione. La misura è stata effettuata due volte, mettendo il *tuner* a 180° e 120° rispetto al *pickup*.

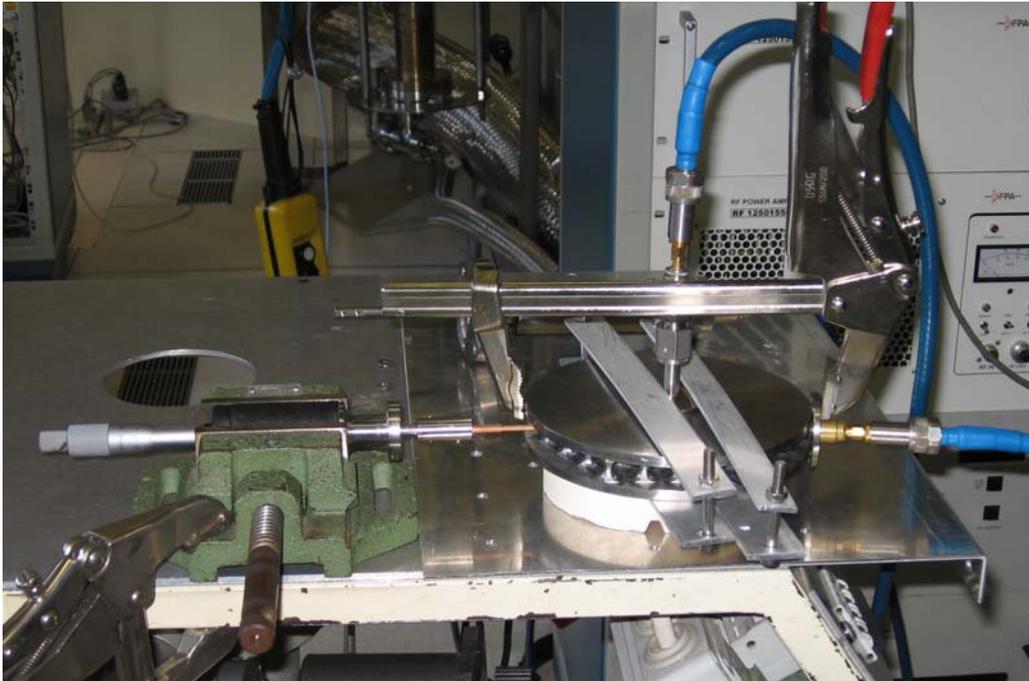


Figura 36: setup per la misura dello spostamento in frequenza. Sulla sinistra si nota l'accordatore collegato al passante micrometrico.

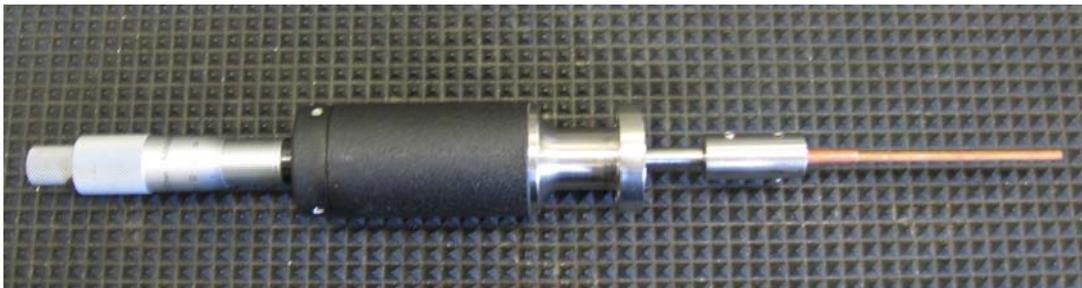


Figura 37: accordatore collegato al passante micrometrico.

La procedura per misurare lo shift di frequenza è la seguente:

1. mettere il sistema di misura in modalità ***onda continua (continuous wave)***;
2. compiere una scansione in frequenza: il programma mostra a video la tensione in uscita dal rivelatore di fase in funzione della frequenza, il rivelatore di fase restituisce un valore in tensione continua proporzionale alla differenza di fase tra il segnale in ingresso e quello in uscita, tale differenza di fase è nulla quando il sistema è in condizione di risonanza.

Misure in Radiofrequenza

3. Identificare la frequenza alla quale il segnale del rivelatore di fase è nullo. Quella è la frequenza di risonanza.

La variazione di frequenza in funzione della distanza dal centro del *tuner* nelle due geometrie studiate è mostrata nei grafici seguenti.

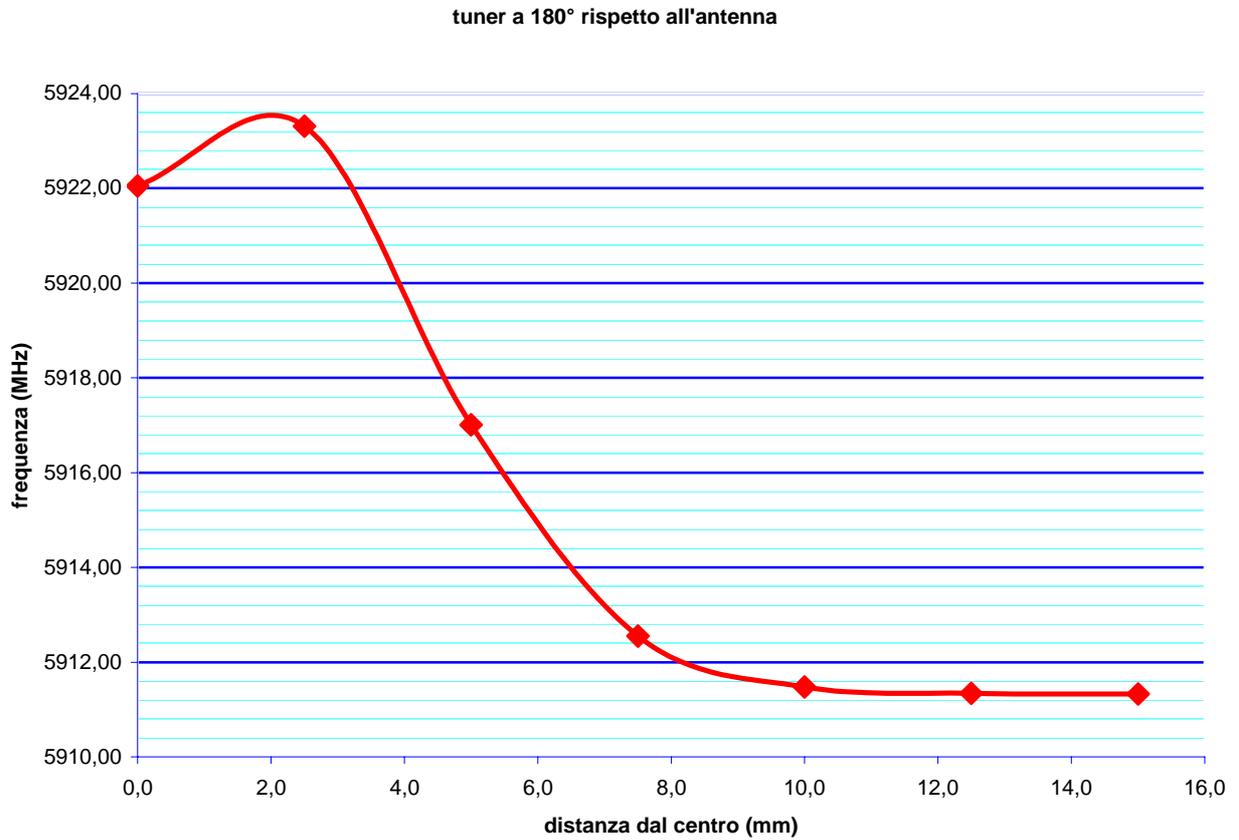


Figura 38: variazione di frequenza in funzione della posizione del tuner (tuner a 180° rispetto all'antenna).

Tuner a 120° rispetto all'antenna

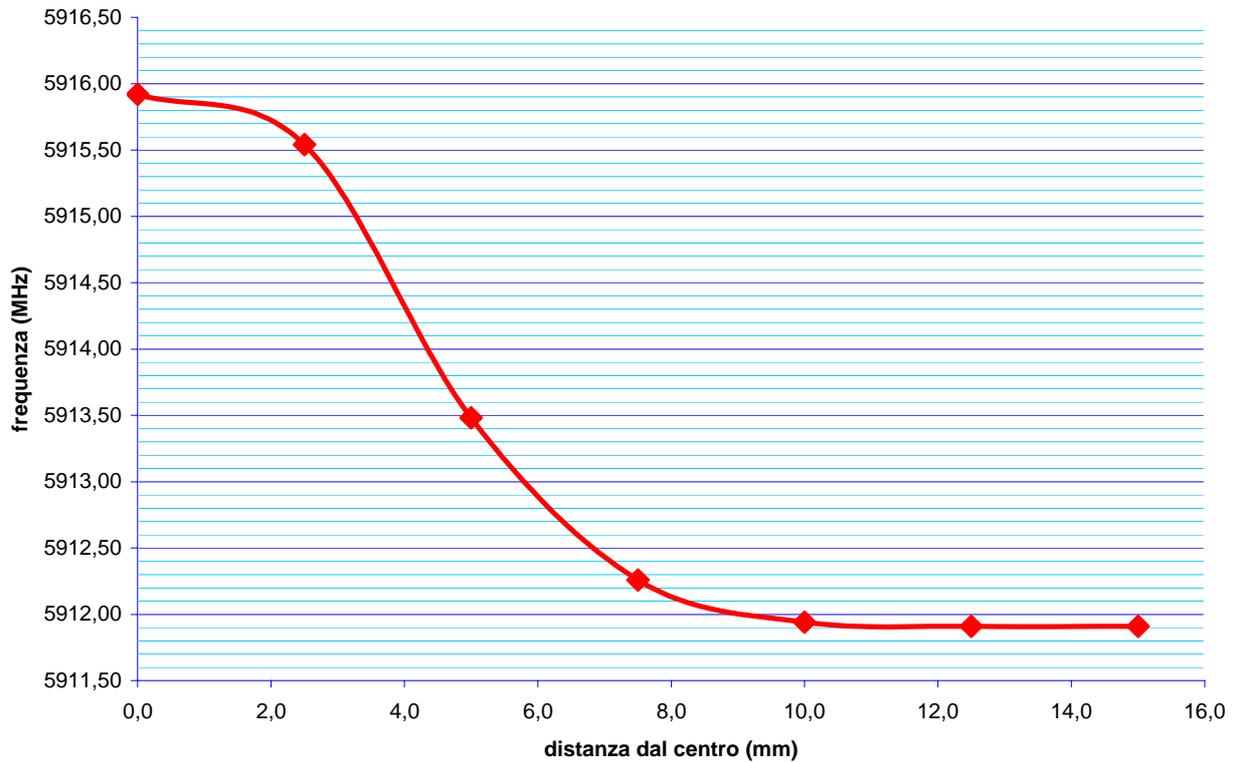


Figura 39: variazione di frequenza in funzione della posizione del tuner (tuner a 120° rispetto all'antenna).

Si osserva che estraendo l'accordatore dalla cavità, la sua frequenza di risonanza diminuisce, stabilizzandosi ad un livello costante quando la barretta di rame è a 10 mm dal centro. Si nota inoltre come la posizione angolare del tuner influisce sulla frequenza di risonanza, aumentandola quando l'angolo è maggiore. È interessante notare il fatto che oltre i 10 mm dal centro, l'accordatore non ha effetti, questo fornisce una chiara indicazione della distribuzione dei campi all'interno della PBG e in particolare mostra come il confinamento del campo sia molto efficace e non ci sia praticamente campo elettrico all'esterno della prima serie di colonnine. Questo risultato è coerente con il fatto che le antenne devono essere introdotte con una grande escursione fra le colonnine per riuscire a prelevare un segnale misurabile. Si può quindi affermare che il confinamento del campo determinato dalla struttura PBG è effettivamente presente e che il modo risonante è concentrato solo nel difetto e non c'è propagazione dei campi all'esterno di esso.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata progettata una cavità risonante superconduttiva di tipo PBG, attingendo alle conoscenze teoriche e tecniche proprie della realizzazione delle cavità acceleranti e integrandole con la teoria dei cristalli fotonici applicata al campo delle microonde.

Si è sviluppato un metodo di costruzione della cavità che evitasse il ricorso a saldature in modo da ridurre i costi ed i tempi di lavorazione ed evitare il decadimento delle proprietà del superconduttore in prossimità dei punti di giunzione.

Le strutture così ottenute hanno subito tutta una serie di trattamenti di tipo meccanico, fisico e chimico volte a migliorarne la finitura superficiale e a preparare la superficie del risonatore per sostenere le condizioni di ultra alto vuoto e di intensi campi propri dell'utilizzo in radiofrequenza della cavità.

La necessità di approntare un sistema criogenico e di misura ha portato alla progettazione di un sistema di tenuta e di raffreddamento da introdurre su un criostato già esistente e modificato per l'utilizzo con cavità del tipo PBG, che essendo strutture completamente aperte presentano problemi di raffreddamento e pompaggio completamente differenti dalle tradizionali cavità a struttura chiusa.

I prototipi a 6 GHz costruiti sono stati caratterizzati in radiofrequenza a temperatura ambiente, misurandone la frequenza di risonanza, il fattore di merito e determinando lo spostamento in frequenza causato dall'introduzione di un *tuner* nello spazio tra le colonnine.

Il lavoro fin qui svolto non presuppone comunque la conclusione del progetto di ricerca su queste cavità, che è necessariamente troppo vasto per esaurirsi all'interno di una sola tesi di master; in particolar modo nell'immediato futuro sono previste le misure della cavità superconduttrice anche a freddo, in modo da ottenere la curva Q vs E_{acc} che caratterizza le prestazioni di una cavità acceleratrice e verificare quale sia il comportamento della PBG in stato superconduttivo e con la presenza di alti campi acceleranti. Nelle misure fin qui condotte si è verificato come il campo elettrico venga confinato in modo efficace da quattro serie di colonnine, rimane da verificare se in stato superconduttivo, con un grandissimo aumento dell'intensità dei campi che si instaurano presso il difetto, il numero di colonnine sia sufficiente per il confinamento o sia necessario ingrandire la struttura.

Ulteriori indagini sono poi necessarie per verificare la distribuzione dei campi all'interno della PBG, confrontandola con le previsioni teoriche e le simulazioni.

La misura a basse temperature necessita necessariamente di un apparato criogenico, risultati positivi nella caratterizzazione di questi primi prototipi costruiti potrebbe stimolare la costruzione di

Conclusioni

un criostato dedicato alla PBG in modo da standardizzare la procedura di misura di queste cavità come è stato fatto negli anni scorsi per altri risonatori superconduttivi.

Infine, il limite ultimo che si vuole raggiungere nel futuro è quello di impiegare veramente queste cavità in un acceleratore di particelle, in questo caso è quindi necessario realizzare anche strutture a multicella, con varie PBG impilate l'una sull'altra; il metodo costruttivo proposto per i prototipi misurati in questa tesi è facilmente adattabile ad esigenze di questo genere e non richiede un investimento tecnico e materiale molto più alto di quello fatto per le cavità a singola cella.

Bibliografia

-
- ¹ S. Schultz, D.R. Smith, N. Kroll: *Photonic Band Gap Resonators for High Energy Accelerators*, PAC 1993
- ² A. Giorgio, D. Pasqua, A.G. Perri: *Cristalli Fotonici: Principi di Funzionamento ed Applicazioni*, www.comunicazioni.it/it/Img/32/2003-CRISTALLI%20FOTONICI%20PERRI.pdf
- ³ C. Roncolato: *Preparazione di un Protocollo di Processo per Dispositivi in Radiofrequenza Superconduttivi ad Alto Fattore di Merito*, Tesi di Master in Trattamenti di Superficie Applicati a Tecnologie Meccaniche Innovative per l'Industria, Università degli Studi di Padova, A.A. 2002/03
- ⁴ A.M. Porcellato: *Principi di Funzionamento e Tecnologie di costruzione delle Cavità di Alpi*, report interno, Legnaro, 15 ottobre 1997
- ⁵ F. Francomacaro: *Struttura a Banda Fotonica come Cavità Risonante per Acceleratori: Progetto, Realizzazione e Misure*, tesi di laurea, Università degli Studi di Napoli Federico II, A.A. 2002/03
- ⁶ B. Cowan, M. Javanmard, R. Siemann; *Photonic Crystal Laser Accelerator Structures*, PAC 2003
- ⁷ E.I. Smirnova, C. Chen, M.A. Shapiro, R.J. Temkin: *An 11 GHz Photonic Band Gap Accelerator Structure with Wakefield Suppression*, PAC 2003
- ⁸ E. Smirnova; *HFSS User Workshop, 2005*
- ⁹ www.webelements.com
- ¹⁰ Takayuki Tomaru, Kunihiko Kasahara, Takakazu Shintomi, Toshikazu Suzuki, Nobuaki Sato, Tomiyoshi Haruyama and Akira Yamamoto; *Heat Transfer Of Several Materials At Cryogenic Temperature*
- ¹¹ H. Padamsee, J. Knobloch, T. Hays; *RF Superconductivity for Accelerators*, 1998, J. Wiley, NY