

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-59/27 (1959)

C. Bernardini, R. Habel, M. Puglisi: UN DISPOSITIVO PER LA MISURA DELLA TENSIONE A RADIO FREQUENZA CHE SI SVILUPPA AL "GAP" DI UNA CAVITA' RISONANTE.

Estratto da: Rendiconti Assoc. Elettronica Italiana 40, 220 (1959)

220/1959 - Un dispositivo per la misura della tensione a radio frequenza che si sviluppa al "gap" di una cavità risonante.

C. BERNARDINI - R. HABEL - M. PUGLISI (*)

Un componente elettronico che in questi ultimi anni ha acquistato grande importanza anche nel campo delle macchine acceleratrici di alta energia, è il risonatore a cavità per alte tensioni e frequenze corrispondenti ad onde metriche. L'impiego di questi risonatori ha posto e va ancora ponendo nuovi problemi. Fra questi uno dei principali è quello della misura della differenza di potenziale che si sviluppa tra le armature del risonatore stesso.

Il componente che qui si propone è un particolare tipo di tubo elettronico che permette la misura, mediante deflessione magnetica, della energia massima di un fascetto di elettroni accelerato da una cavità risonante.

Il dispositivo unisce alla semplicità di concezione e di realizzazione la caratteristica di non perturbare apprezzabilmente il risonatore e di essere indipendente dalla geometria di esso, ed in questo si differenzia dagli usuali dispositivi (spira o antenna, che vengono descritti, per confronto, nella prima parte della presente relazione). La misura della tensione a RF è sostanzialmente ridotta alla misura di un campo magnetico costante di qualche centesimo di weber/m². Un prototipo del componente che si propone è stato realizzato e provato con una cavità delle seguenti caratteristiche:

Frequenza = 173 MHz

Distanza fra gli elettrodi = 10 mm

e con tensioni intorno al migliaio di volt. Esso verrà successivamente impiegato per la misura di tensioni dell'ordine di 100 kV.

INTRODUZIONE.

Il problema della misura della differenza di potenziale (d.d.p.) che si sviluppa tra due elettrodi (GAP) di una cavità risonante, è un problema notevolmente complesso sotto parecchi punti di vista. Prima di tutto la d.d.p. da misurare, essendo rapidamente variabile (in genere sinusoidale a radiofrequenza), non è suscettibile di misura diretta; in secondo luogo il sistema che preleva la d.d.p. incognita al gap del risonatore perturba notevolmente il sistema in studio. Basta infatti pensare che le migliori testine di misura per tensioni a radiofrequenza hanno una capacità propria di almeno due picofarad, per comprendere che questo significa che a una frequenza, per esempio, di 100 MHz la reattanza che il sistema di misura mette in parallelo alla d.d.p. da misurare vale circa 1000 ohm. In terzo luogo la d.d.p. incognita può raggiungere facilmente e in zone geometricamente molto limitate dei valori molto grandi. Per esempio nelle cavità risonanti delle grandi macchine acceleratrici per protoni ed elettroni si sono raggiunte tensioni di cresta anche di 350 000 volt; nelle guide d'onda a velocità di pro-

pagazione ridotta proprie degli acceleratori lineari e degli amplificatori ad « onda elettronica », si sono raggiunti campi dell'ordine di 250 000 V/cm. A complicare ulteriormente il problema si aggiunge il fatto che la misura di d.d.p. così elevata deve poter essere fatta talvolta anche in tempi molto brevi. Nella tecnica usuale delle correnti a radiofrequenza, come nel campo delle microonde, impulsi di tensione ad altissima frequenza e della durata di qualche microsecondo sono abbastanza comuni.

Queste sono in breve le principali difficoltà che si incontrano quando si vogliono eseguire direttamente le misure di d.d.p. in cavità risonante. Fino ad ora, per quanto ci consta, la misura della d.d.p. che si manifesta al gap dei risonatori a cavità, specialmente per quelli usati nei Klystron di potenza e nelle macchine acceleratrici di particelle, si esegue indirettamente con il metodo della antenna o della spira di accoppiamento o addirittura con misure di potenza.

Allo scopo di illustrare i vantaggi del tubo che proponiamo, riportiamo qui brevemente il metodo di misura con spire cercando di mettere in evidenza le cause che limitano la precisione del metodo stesso.

Sostanzialmente la misura della d.d.p. incognita attraverso la spira di accoppiamento si esegue misurando la d.d.p. che si desta ai capi di una piccola spira posta in opportune zone del risonatore a cavità. Naturalmente questo metodo si fonda sulla conoscenza quantitativa della distribuzione del campo elettromagnetico entro il risonatore e sul fatto che la spira di misura deve essere così piccola da non perturbare apprezzabilmente la geometria del risonatore stesso. Infatti quando il risonatore è eccitato con una tensione di pulsazione ω ai capi della spira di misura si desta una forza elettromotrice pure di pulsazione ω che ha il valore

$$(1) \quad V_0 = \omega \int_s B \times n \, ds$$

nella ipotesi che le dimensioni lineari della spira siano effettivamente trascurabili rispetto alle lunghezze d'onda in gioco.

Se, come si è detto, la spira di misura non perturba il risonatore allora la V_0 definita dalla (1) è direttamente collegabile attraverso un opportuno parametro ξ alla tensione al gap. Nei casi più semplici il parametro ξ che si può anche chiamare rapporto di trasformazione tra gap e spira corrisponde al rapporto tra il flusso abbracciato dalla spira e il flusso concatenato con la linea lungo la quale si vuol misurare la d.d.p. incognita. In generale, a parte le perturbazioni geometriche dovute all'ingombro della spira, il parametro ξ si può calcolare partendo dalle equazioni di Maxwell; ma quello che non si può sicuramente valutare è il rapporto tra la tensione V_0 definita dalla (1) e la tensione V che si legge effettivamente sulla spira per mezzo dello strumento di misura.

La differenza tra la tensione V_0 e la tensione V è dovuta alle seguenti cause: in primo luogo la resistenza in-

(*) Dr. CARLO BERNARDINI, Dr. ROBERTO HABEL, Dr. ing. MARIO PUGLISI, dei Laboratori Nazionali di Frascati del C.N.R.N.

terna dello strumento di misura e soprattutto la sua capacità propria fanno sì che la spira di misura venga percorsa da correnti a radiofrequenza che alterano il campo proprio del risonatore. In secondo luogo l'impedenza di uscita della spira di accoppiamento non si mantiene costante al variare dell'energia che il generatore fornisce al risonatore e quindi il rapporto tra la V e la V_0 diviene funzione del livello di eccitazione del risonatore stesso.

Le ragioni ora esposte, che tra l'altro non comprendono le cause di errore sistematico introdotte dalla non linearità del circuito rivelatore, impongono di eseguire una taratura della spira di misura, una volta accoppiata al circuito rivelatore. Questa taratura però deve avvenire necessariamente quando i livelli nel risonatore sono bassi e con notevoli perturbazioni del funzionamento del risonatore per le ragioni già dette.

Quando il risonatore viene eccitato a piena potenza allora la taratura precedente perde molto del suo valore in quanto, come già si è detto, nella espressione della impedenza di uscita della spira compaiono, e nemmeno linearmente, i parametri di uscita del generatore; questi a loro volta dipendono dal punto di lavoro e dal livello di eccitazione.

La misura indiretta fatta con il metodo dell'antenna è sostanzialmente analoga a quella fatta con spira; questa volta il segnale è prelevato da una opportuna antenna che legge il campo elettrico locale e questo, tramite le equazioni di Maxwell, viene collegato al potenziale al gap.

DESCRIZIONE DEL NUOVO DISPOSITIVO.

L'apparecchio che qui proponiamo permette il passaggio, per mezzo di un sottile tubo di quarzo, ad un fascetto di elettroni di bassissima intensità attraverso il gap dove esiste la d.d.p. incognita e la misura della massima energia acquistata dagli elettroni mediante deflessione in un campo magnetico.

La misura della d.d.p. incognita viene così ricondotta alla misura di un campo magnetico continuo. Per meglio chiarire la tecnica della misura consideriamo lo schema riportato nella fig. 1.

In C è indicato il cannone elettronico che attraverso un accurato sistema ottico-elettronico manda il fascetto di elettroni ben collimato lungo il tubo T che attraversa il gap di un risonatore R (la cavità è di tipo Klystron

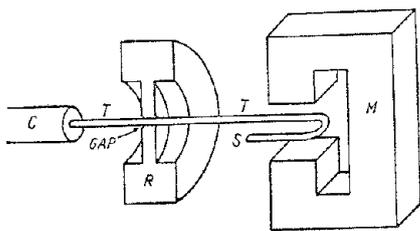


Fig. 1.

ed è rappresentata in sezione). Il tubo T termina con una curva circolare ad U tra le espansioni polari di un magnete M del quale si può variare con continuità il campo magnetico.

Qualitativamente il funzionamento del tubo di misura è il seguente: fissato il raggio di curvatura R dell'asse del tubo T (individuato in pratica da opportuni diaframmi), si regola il campo su un certo valore B_0 in modo che sullo schermo fluorescente S posto all'estremità di T si formi un punto luminoso quando il risonatore non è eccitato. Se ora si eccita il risonatore, lo schermo fluorescente sarà sempre illuminato per tutti quei valori del campo magnetico inferiori ad un certo valore massimo

B_{max} (corrispondente ad elettroni di energia pari alla somma dell'energia qV_0 acquistata nel cannone più l'energia massima qV acquistata nel passaggio attraverso la cavità). Per campi $B > B_{max}$ tutte le traiettorie hanno raggio di curvatura minore di quello dell'asse del tubo e non riescono a raggiungere lo schermo. Misurando quindi V_0 , R , B_{max} e detti q la carica dell'elettrone ed m la sua massa, V si determina dalla formula

$$V = \frac{q B_{max}^2 R^2}{2 m} \quad V_0 = \frac{q R^2}{2 m} (B_{max}^2 - B_0^2)$$

Si può ora vedere che V coincide con la tensione di cresta del risonatore quando il tempo di transito degli elettroni utili entro la cavità è molto breve rispetto al periodo di essa. Detta ω la pulsazione della tensione a R.F., e d la distanza fra gli elettrodi, a causa dell'effetto del tempo di transito la V misurata risulta inferiore, alla tensione massima al gap, di ΔV , determinato da

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\omega^2 d^2}{c^2} \left(\frac{m c^2}{q V_0} \right) F(z)$$

c = velocità della luce

$$z^2 = V_0/V$$

$$F(z) = z \sqrt{1 + z^2} - z^2$$

Questa formula vale beninteso per

$$\frac{\Delta V}{V} \ll 1$$

Per comodità, diamo una breve tabella di $F(z)$.

z	$F(z)$
0.05	0.0476
0.10	0.0905
0.15	0.1292
0.20	0.1640
0.25	0.1952
∞	0.5000

CONSIDERAZIONI SULLA MISURA.

Le sorgenti principali d'errore sono:

- 1) l'apertura dei diaframmi che lasciano passare gli elettroni;
- 2) la determinazione del valore dell'induzione B e gli eventuali effetti ai bordi del magnete;
- 3) la determinazione di V_0 .

Per quanto riguarda il punto 1), l'apertura lineare minima f , nel piano delle traiettorie (e quindi dell'asse del tubo) dei diaframmi introduce un errore pari

$$\frac{\Delta V}{V} = \pm \frac{f}{R}$$

Una disposizione ottima dei diaframmi sarebbe la seguente: si pone un diaframma D_1 all'ingresso del tratto curvo di T ed un diaframma D_2 all'uscita, ambedue con apertura lineare f . D_1 definisce la sorgente di elettroni e la rende puntiforme per quanto basta ai fini della precisione della misura; D_2 analogamente definisce l'asse del tubo T e quindi il raggio di curvatura R con l'errore $\pm f/2$. L'apertura angolare del fascetto di elettroni emergente da D_1 non ha alcuna influenza grazie al fatto che l'immagine ottico-elettronica di D_1 cade esattamente in D_2 essendo il magnete a campo uniforme e la deflessione pari a 180° .

In pratica è però sufficiente anche un solo diaframma a metà strada tra D_1 e D_2 . Se questo non limita troppo

l'intensità del fascetto e quindi la luminosità del puntino indicatore sullo schermo fluorescente.

Per quanto riguarda il punto 2), notiamo che per tensioni ≤ 100 kV e scegliendo il raggio $R \leq 10-20$ cm i valori di B restano sempre ragionevolmente bassi e conseguentemente lontani dalla saturazione: questo è tuttavia un male secondario entrando in gioco solo attraverso le disuniformità del campo e non attraverso il valore di esso lungo la traiettoria, posto che si impieghi uno strumento di misura di B adeguato agli scopi. Bisogna però prestare attenzione ad un punto: il campo magnetico disperso ai bordi d'entrata ed uscita del magnete influenza il valore medio di B lungo la traiettoria (1). Per correggere questo effetto è necessario determinare la posizione relativa del centro di curvatura della parte circolare del tubo T rispetto al bordo del ferro del magnete mediante l'aiuto di una tensione d'accelerazione continua nota con sufficiente accuratezza (per es. la stessa V_0). In genere il centro di curvatura di T risulterà leggermente esterno al ferro del magnete e, se non vi è saturazione, la sua posizione sarà indipendente dal valore di B all'interno del traferro.

La terza causa di errore nel metodo predetto risiede nella determinazione di V_0 . Ma V_0 è una tensione continua ed è quindi possibile misurarla con tutta la precisione voluta; è necessario assicurarsi che durante la misura la tensione V_0 si mantenga costante.

Con quanto detto fino ad ora riteniamo di aver chiarito sufficientemente il metodo da noi proposto.

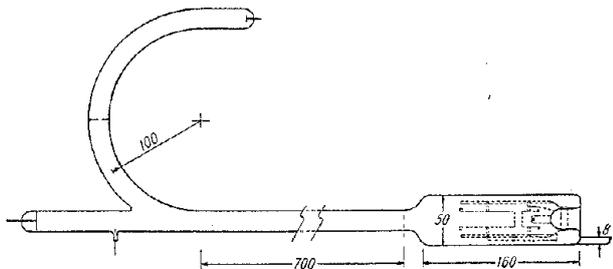


Fig. 2.

Attualmente presso i Laboratori Nazionali di Frascati si sta costruendo un tubo del tipo di quello indicato per fare le misure sulle cavità risonanti del sincrotrone.

Il prototipo del tubo di misura, adatto per bassa tensione, sul quale sono stati fatti i rilievi per progettare il tubo adatto alle misure sulle cavità dell'elettrosincrotrone, è realizzato completamente in vetro pyrex ed ha le dimensioni indicate nella fig. 2.

Il cannone elettronico è quello che montano i tubi oscillografici Dumont 5ABPI. Tutto il tubo è verniciato internamente di acquadag per evitare l'accumulo di cari-

che elettriche ed è messo sotto vuoto con un banco «Galileo» da 300 l/s.

Il grado di vuoto con il quale si sono fatte le misure è dell'ordine di $3 - 5 \cdot 10^{-6}$ mmHg. In fig. 3 sono date le dimensioni del magnete analizzatore che è realizzato in ferro massiccio in quanto lavora in corrente continua ed ha un grande traferro. Per provare il tubo nelle peggiori condizioni si è deciso di provare con una cavità risonante di tipo Klystron da 173 MHz eccitata ad autoscillatore

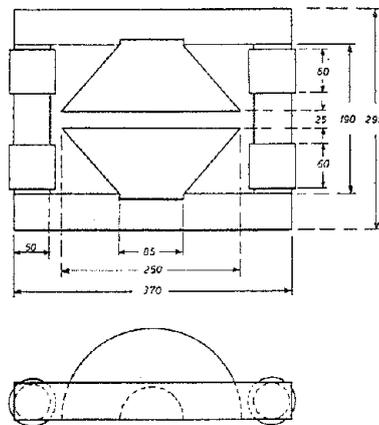


Fig. 3.

con un triodo di tipo 24 G che permette di raggiungere circa 500 volt di tensione al gap malgrado il carico introdotto dal tubo di pyrex.

La tecnica impiegata nelle misure è la seguente: si dà al cannone una tensione acceleratrice V_0 e si regola la corrente I_0 nel magnete in modo da centrare il fascio sull'elettrodo raccogliatore. Si accende la radio-frequenza e si cerca quella corrente I che fa riapparire il fascio. Se indichiamo con ΔV la d.d.p. impressa agli elettroni dalla cavità e se ΔV è piccolo rispetto a V_0 si ha:

$$\Delta V = 2 V_0 \frac{\Delta i}{I_0 + I}$$

Riportiamo qui di seguito due delle misure eseguite:

$$\left. \begin{array}{l} V_0 = 5750 \text{ Volt} \\ I_0 = 250 \text{ mA} \\ I_1 = 260 \text{ mA} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta V = 450 \text{ Volt}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_0 = 4900 \text{ Volt} \\ I_0 = 215 \text{ mA} \\ I_1 = 225 \text{ mA} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta V = 445 \text{ Volt}$$

(1) N. D. COGGESHALL, J. Appl. Phys., 18, 855 (1947).