

MAGNETOIONICA, TEORIA — Teoria enunciata da Nichols e Shellen e verificata, mediante geniali esperienze, da De Pace e Todesco. Secondo tale teoria, quando onde elettromagnetiche si propagano in un mezzo ionizzato, sotto l'azione di un campo magnetico, esiste una frequenza di risonanza, in corrispondenza della quale gli elettroni liberi del mezzo ionizzato, ruotano secondo orbite circolari. La frequenza di risonanza prende il nome di *frequenza giromagnetica*; v. LUSSEMBURGO, EFFETTO —.

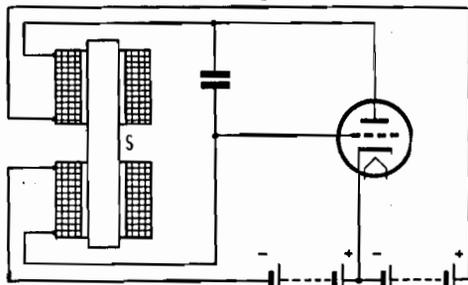
MAGNETOMETRO. Un magnetometro è costituito nella sua forma più semplice, da un ago magnetizzato sostenuto, nel suo baricentro, da un filo a torsione trascurabile. Al filo è connesso uno specchietto cui è affidato il compito di consentire la lettura delle deviazioni dell'ago, col metodo della leva ottica. Sebbene col magnetometro sia possibile misurare l'intensità di un campo magnetico uniforme, nel piccolo volume in cui l'ago agisce, sia considerando il periodo di oscillazione dell'ago nel campo (*determinazione dinamica*), sia considerando il momento di torsione del filo (*determinazione statica*), tuttavia, per eseguire tali misure si preferisce ricorrere a sistemi più pratici, per cui il magnetometro viene impiegato solamente per rivelare campi magnetici o per condurre operazioni di azzeramento, ossia, viene impiegato preferibilmente come *magnetoscopio* (determinazioni qualitative).

MAGNETOSCOPIO: v. MAGNETOMETRO.

MAGNETOSTATICA. È il capitolo della elettrofisica moderna che tratta dei magneti permanenti, del loro calcolo e delle azioni reciproche tra poli magnetici efficaci. Il termine *magnetostatica* è impiegato parallelamente al termine *elettrostatica*, per porre in risalto la corrispondenza, sia pure formale, dei due rami della fisica. Per i vari argomenti rinviamo alle voci: MAGNETE; MAGNETISMO; MAGNETISMO TERRESTRE; MAGNETIZZAZIONE, VETTORE —; MATERIALI MAGNETICI; POLO MAGNETICO EFFICACE; POLO MAGNETICO LIBERO; SMAGNETIZZAZIONE, VETTORE —.

MAGNETOSTRIZIONE. Chiamasi *magnetostrizione*, la deformazione di tipo elastico che alcuni corpi ferromagnetici e loro leghe subiscono, sotto l'azione di un campo magnetico. È da porre in evidenza il fatto che, tale deformazione, segue le eventuali variazioni dell'intensità del campo che le produce con inerzia assai modesta, inferiore a 10^{-6} secondi. La magnetostrizione è *positiva* in alcuni corpi, come ad esempio nel ferro, in cui la magnetizzazione causa un allungamento, in

direzione parallela alle linee di flusso del campo magnetizzante per bassi valori dello stesso; è invece *negativa* in altri materiali, come ad esempio nel nichel, in cui la magnetizzazione determina un accorciamento, in direzione parallela alle linee di flusso del campo magnetizzante. Un cilindro di nichel, magnetizzato in direzione assiale e posto lungo l'asse nell'interno di un solenoide, percorso da corrente alternata, esegue vibrazioni longitudinali forzate. Un tale dispositivo, così eccitato a vibrare, tenuto a temperatura costante, può costituire un *campione di frequenza* specialmente conveniente per frequenze comprese tra poche centinaia di hertz e circa 100.000 Hz. Infatti, l'ampiezza delle oscillazioni magnetostrittive raggiunge il suo massimo, quando le dimensioni geometriche del corpo immerso nel campo magnetico oscillatorio determinano per questo una frequenza di vibrazione coincidente con la fre-



Generatore stabilizzato magnetostrittivamente.

quenza con cui oscilla il campo magnetico (risonanza). I campioni di frequenza magnetostrittivi permettono di raggiungere frequenze più basse che non i campioni basati sui fenomeni piezoelettrici, che richiederebbero cristalli troppo grandi e quindi assai costosi. In figura è rappresentato il circuito di un *generatore a magnetostrizione*, dovuto a Pierce. Con S è indicata la barretta di materiale ferromagnetico.

MAGNETRON. Il *magnetron* è un particolare diodo a flusso elettronico controllato con la peculiarità che il controllo, anziché essere effettuato, come nei comuni triodi, mediante un campo elettrico, è affidato a un campo magnetico generato mediante un solenoide posto esternamente al tubo e coassiale col catodo, oppure mediante un magnete permanente. Il magnetron rappresenta attualmente il tubo più diffuso per la generazione di potenza, in regime impulsivo (anche oltre 1000 kW) di oscillazioni di frequenza superiore a 700 MHz.

a) *GENERALITÀ.* Si consideri il diodo rap-

presentato in figura 1, costituito da un anodo cilindrico *A* e da un filamento *F*, con esso coassiale. Se all'anodo è applicato un potenziale positivo, rispetto al catodo (generalmente ad accensione diretta) e questo è regolarmente acceso, gli elettroni da esso emessi raggiungono l'anodo, con percorso rettilineo, come è indicato dai tratti punteggiati di figura 1

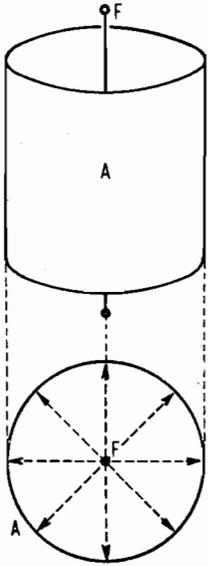


Fig. 1 - Diodo ad anodo cilindrico.

Quando il magnetron è regolarmente acceso, gli elettroni da esso emessi raggiungono l'anodo, con percorso rettilineo, come è indicato dai tratti punteggiati di figura 1

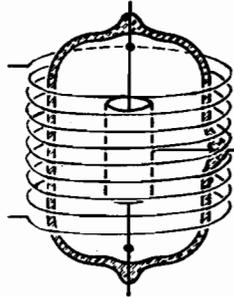


Fig. 2 - Avvolgimento attorno a un diodo, per ottenere un campo magnetico assiale, per effetto di una corrente che percorra l'avvolgimento (effetto magnetron).

(pianta). Si immagini ora un campo magnetico agente, le cui linee di flusso siano parallele all'asse del tubo, ciò che si ottiene, ad esempio, avvolgendo attorno a questo un certo numero di spire di filo percorso da una corrente elettrica (v. figura 2). Per effetto di questo campo, le traiettorie degli elettroni si incurvano e, ogni elettrone, percorre l'inter-

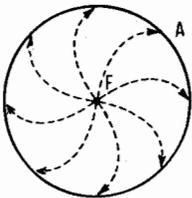


Fig. 3 - Curvatura delle traiettorie degli elettroni nello spazio catodo-anodo, a causa dell'effetto magnetron.

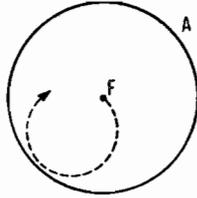


Fig. 4 - Traiettoria di un elettrone in corrispondenza del valore critico del campo magnetico agente assialmente.

vallo catodo-anodo, descrivendo approssimativamente un arco di circonferenza (v. fig. 3). Aumentando gradualmente il valore del campo magnetico agente, le traiettorie si incurvano sempre più, finchè, in corrispondenza di un valore del campo, detto *valore critico*, le traiettorie degli elettroni risultano tangenti all'anodo (fig. 4) e gli elettroni ricadono

sul filamento, determinando la cessazione della corrente anodica. Portando in un sistema di coordinate cartesiane ortogonali, il valore dell'induzione magnetica in ascisse e, in ordinate, il valore I_a della corrente anodica, si ha la curva di fig. 5, nota sotto il nome di *curva caratteristica di Hull*. In figura, con B_c abbiamo indicato il valore critico dell'induzione.

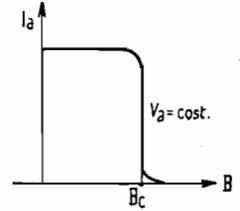


Fig. 5 - Curva caratteristica di Hull.

Supposto che gli elettroni si muovano con velocità uniforme, se B è il valore dell'induzione magnetica in $[Wb/m^2]$, si può scrivere che il raggio della loro traiettoria (normale alla direzione del campo magnetico) è dato, in $[m]$, da:

$$[1] \quad r = 3,38 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{V_a}}{B}$$

se con V_a in $[V]$ si è indicata la tensione anodica (v. OTTICA ELETTRONICA). Dalla [1] è facile ricavare il valore di induzione critico, in funzione del diametro interno d dell'anodo:

$$B_c = 13,5 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{V_a}}{d}$$

il che vuol dire, tanto per dare un'idea delle grandezze in gioco, che con un diametro di 10 mm e una tensione anodica di 10 kV: $B_c = 0,135 Wb/m^2$, cioè 1350 gauss.

Per $B = B_c$ si dovrebbe avere una brusca caduta di corrente anodica, in pratica ciò non è, a causa della non uniforme velocità degli elettroni, a causa del fatto che il c.m. non è costante nello spazio interessato, ecc.

È evidente che, se l'induzione B oscilla attorno al al valore B_c , la corrente anodica diverrà oscillante, in quanto, un aumento del valore di quella superiore a B_c , interdice la corrente, mentre, una diminuzione al di sotto di questo valore, ne determina di nuovo il passaggio, per cui la corrente anodica sarà in opposizione di fase, rispetto alla corrente che determina il campo magnetico.

b) IL MAGNETRON COME GENERATORE DI OSCILLAZIONI ELETTRICHE LA CUI FREQUENZA È DEFINITA DALLE COSTANTI DEL CIRCUITO ESTERNO. Ben scarso interesse pratico presenta il magnetron impiegato per la generazione di oscillazioni elettriche a frequenza relativamente bassa, la cui grandezza sia dell'ordine delle frequenze generate sfruttando la resistenza negativa del triodo. Ma anche alle frequenze più elevate i due tipi di magnetron che ora passiamo a descrivere, pur

oscillando con rendimenti abbastanza elevati, non hanno grande stabilità di frequenza e non si prestano a erogazioni di energia notevoli.

Due sono i principi su cui si basa l'impiego del magnetron, per ottenere oscillazioni elettriche la cui frequenza è definita dalle costanti del circuito esterno, uno impiegante un tubo ad anodo intero, l'altro, impiegante un tubo ad anodo sezionato. Accenneremo a entrambi brevemente.

Nella sua forma originaria (magnetron ad anodo intero) questo tubo è dovuto a A. W. Hull che lo ideò nel 1921. Il magnetron di Hull, sebbene capace di generare frequenze elevatissime (in laboratorio si è scesi a $\lambda = 6,4$ mm), ha rendimento assai basso. Nel 1929 il giapponese Okabe costruì il primo magnetron ad anodo sezionato capace di oscillare con lunghezze d'onda comprese nel vastissimo intervallo tra 1 cm e 5000 m.

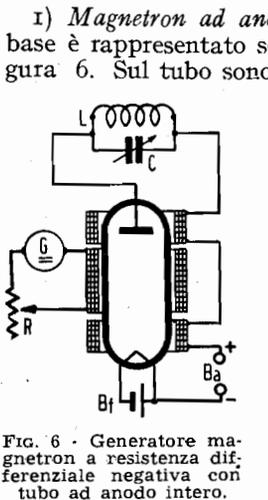


FIG. 6 - Generatore magnetron a resistenza differenziale negativa con tubo ad anodo intero.

B_f è la batteria di accensione. Il reostato R va regolato in modo da portare l'induzione magnetica a un valore leggermente inferiore a B_c . Si avrà allora corrente anodica. Ma appena la corrente anodica inizia a scorrere, il campo aumenta, a causa dell'incremento dovuto allo scorrere di questa, nell'avvolgimento relativo. Se i vari componenti sono ben dimensionati e regolati e i sensi degli avvolgimenti quelli giusti, questo aumento porterà il valore del campo al di sopra del valore critico, con conseguente cessazione della corrente anodica, ripristino delle condizioni primitive, e così via. Il sistema si comporta quindi come una resistenza differenziale negativa.

2) *Magnetron ad anodo sezionato.* In fig. 7 è rappresentato un magnetron ad anodo sezionato. Sia il valore dell'induzione magnetica superiore al valore critico. Se i potenziali

V_1 e V_2 , applicati alle due sezioni dell'anodo, coincidono, non esiste d.d.p. fra le due sezioni e gli elettroni si muovono, secondo traiettorie chiuse, praticamente circolari, come è indicato in fig. 8 a). Supponiamo ora che il potenziale V_1 applicato alla sezione A_1 sia sensibilmente superiore al potenziale V_2 . Fra le due sezioni si formerà allora un campo elettrico che sarà particolarmente intenso in prossimità delle fenditure. In b), abbiamo indicato le linee di flusso di questo campo. Quando un elettrone incontra detto campo intenso, verrà deviato dalla sua traiettoria e, per certi valori dei parametri che definiscono il suo moto, potrà cadere sulla sezione a potenziale maggiore, come è indicato in fig. 8 c). Il moto degli elettroni che non passeranno in vicinanza delle fenditure, sarà praticamente indisturbato. Si avrà così una certa corrente anodica I_1 , in corrispondenza della sezione A_1 e corrente anodica nulla, nel circuito dell'altra sezione. Si aumenti ora gradatamente il potenziale V_2 di A_2 . Avremo, a un certo istante, essendo

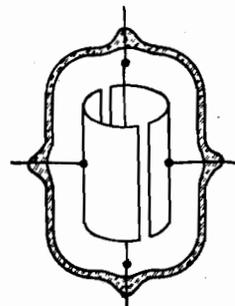


FIG. 7 - Tubo magnetron ad anodo sezionato.

per certi valori dei parametri che definiscono il suo moto, potrà cadere sulla sezione a potenziale maggiore, come è indicato in fig. 8 c). Il moto degli elettroni che non passeranno in vicinanza delle fenditure, sarà praticamente indisturbato. Si avrà così una certa corrente anodica I_1 , in corrispondenza della sezione A_1 e corrente anodica nulla, nel circuito dell'altra sezione. Si aumenti ora gradatamente il potenziale V_2 di A_2 . Avremo, a un certo istante, essendo

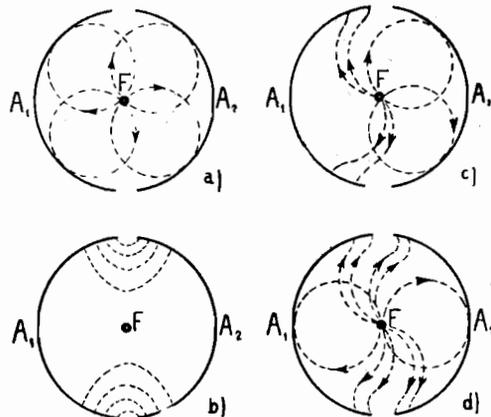


FIG. 8 - Funzionamento del magnetron ad anodo sezionato.

diminuito il valore del campo elettrico, che la deviazione di un elettrone che passa in vicinanza di una fenditura, potrà non essere tanto accentuata da evitare la caduta dell'elettrone sull'anodo A_2 che, però, sarà ancora a potenziale minore di A_1 [v. fig. 8 d)]. Ecco allora che, in entrambe le sezioni, si avranno due correnti nonnulle I_1 e I_2 . Au-

mentando ulteriormente V_2 , il campo elettrico diminuirà sempre più, in quanto il potenziale V_2 tenderà sempre più al valore V_1 . Le due correnti I_1 e I_2 diminuiranno allora e saranno nulle per $V_2 = V_1$. In quest'ultima

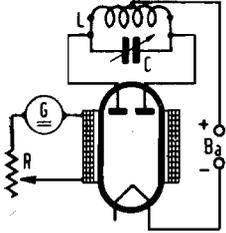


FIG. 9 - Generatore magnetron di oscillazioni di frequenza legata alle caratteristiche del circuito esterno, utilizzando un tubo ad anodo sezionato.

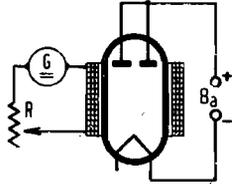


FIG. 10 - Stesso circuito di fig. 9, ma destinato alla generazione di frequenze elevate.

fase dell'esperienza, la I_2 diminuiva, all'aumentare della V_2 il che significa che il sistema considerato costituisce una resistenza differenziale negativa. Se alle due sezioni viene applicata una tensione oscillante, che si sovrapponga alla tensione anodica V_a (v. circuito di fig. 9), otterremo nel circuito oscillatorio LC oscillazioni elettriche che potranno anche venire utilizzate, in quanto il sistema è pure capace di compensare non solo l'energia dissipata in perdite, ma anche l'energia prelevata per l'utilizzazione. Il generatore G fornisce la corrente per la creazione del campo e questo verrà regolato agendo su R , a un valore leggermente superiore a B_c . La frequenza delle oscillazioni generate è praticamente uguale alla frequenza propria del circuito oscillatorio LC . Mediante il circuito di fig. 10, in cui l'induttanza e la capacità sono ridotte alla pura induttanza e alla pura capacità distribuite nei collegamenti, si possono ottenere oscillazioni di frequenza dell'ordine dei 300 MHz. Con tubi del tipo di quello descritto si ottengono normalmente lunghezze d'onda di $2 \div 4$ m. La frequenza delle oscillazioni risulta legata a quella propria del circuito oscillatorio esterno e pare del tutto indipendente dalla tensione degli elettrodi.

c) **IL MAGNETRON PER LA GENERAZIONE DI OSCILLAZIONI LA CUI FREQUENZA NON È LEGATA ALLE CARATTERISTICHE DEL CIRCUITO ESTERNO.** Il magnetron può venire impiegato come generatore, anche sfruttando altri principi di funzionamento. La frequenza delle oscillazioni generate non sarà più determinata dalle costanti del circuito, ma sarà strettamente legata alla velocità degli elettroni, ponendo così raggiungere valori particolarmente elevati. Anche in questo caso, accenneremo all'impiego di tubi ad anodo intero, sia

all'impiego di tubi ad anodo sezionato, passando poi da questi ai tubi a cavità multiple, che tanta importanza hanno assunto durante la seconda guerra mondiale, in applicazione ai radar.

Ma prima ricordiamo che Gill e Megaw, i quali sperimentarono lungamente sui magnetron ad anodo sezionato, constatarono quanto segue. Per frequenze comprese tra 30 e 400 MHz, il meccanismo di funzionamento del magnetron è senz'altro basato sull'effetto di resistenza negativa, più sopra accennato. Il valore del campo magnetico non influisce sulla frequenza delle oscillazioni generate, legata a quella propria del circuito esterno. Per un dato valore della tensione anodica il valore ottimo dell'induzione magnetica risulta indipendente dalla frequenza. Ma per frequenze superiori ai 400 MHz, Gill e Megaw poterono constatare che, variando l'induzione magnetica B , per determinati valori di quest'ultima, il sistema entra in oscillazione con particolare evidenza. Si è in presenza di un fenomeno, simile alla risonanza, tale per cui Gill battezzò le oscillazioni ottenute: «oscillazioni di risonanza». Lo stesso Gill propose una teoria matematica per spiegare questo fenomeno, nota come teoria della precessione degli elettroni, concludendo con la possibilità per gli elettroni di descrivere un lungo percorso a spirale in fuori (traettoria a «coda di porco») prima di raggiungere il segmento anodico a potenziale positivo. Va aggiunto che Kilgore, con una esperienza assai elegante, è riuscito a rendere visibili le traiettorie degli elettroni e a fotografarle, confermando la teoria elementare di Gill. Si può facilmente comprendere che la frequenza, per la quale l'oscillazione è particolarmente energica, è legata al periodo di rotazione dell'elettrone e quindi dipende dal valore dei parametri elettrici e magnetici in gioco, oltre che dalle dimensioni fisiche del tubo.

1) **Magnetron ad anodo intero.** Il funzionamento di un tubo magnetron ad anodo intero, impiegato come generatore di oscillazioni di frequenza dell'ordine di grandezza dei

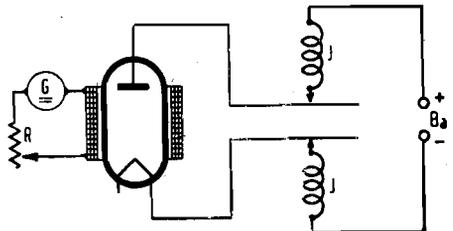


FIG. 11 - Generatore magnetron ad anodo intero per la generazione di oscillazioni la cui frequenza non è legata alle caratteristiche del circuito esterno.

3000 MHz, ha punti in comune con il generatore a campo frenante Barkhausen-Kurz. Si consideri il circuito di impiego, rappresentato in fig. 11. Ai due elettrodi del tubo fa capo un sistema di fili di Lecher. B_a è la batteria anodica, J due impedenze di RF ed R il reostato che permette di portare l'induzione magnetica a un valore leggermente superiore a B_c ; gli elettroni descrivono quindi, come abbiamo visto, orbite chiuse, sfiorando l'anodo. Se il potenziale anodico è V_a , in corrispondenza di questo potenziale la corrente anodica sarà nulla. Si parta dal presupposto che il sistema sia già in oscillazione e che la tensione anodica oscilli simmetricamente attorno al potenziale base V_a , fra due valori limiti $V_{a \max}$ e $V_{a \min}$, per cui potremo scrivere:

$$V_{a \max} > V_a > V_{a \min}$$

Si supponga inoltre, che il periodo T di tali oscillazioni coincida col tempo che un elettrone impiega a percorrere la sua orbita chiusa, in corrispondenza del potenziale anodico V_a costante (fig. 12). In base a questa ipotesi, si consideri ora un elettrone che fuoriesca dal catodo nell'istante in cui la tensione anodica è massima ($V_{a \max}$). Se tale tensione rimanesse costante a questo valore, l'elettrone raggiungerebbe l'anodo secondo la traiettoria indicata in fig. 13, a tratti. Ma, nel tempo che l'elettrone impiega a percorrere l'intervallo filamento-anodo, il potenziale anodico, per l'ipotesi fatta sul valore del periodo delle oscillazioni, sarà sceso dal valore $V_{a \max}$ al valore minimo $V_{a \min}$, per cui la traiettoria seguita dall'elettrone, non sarà più quella indicata con linea a tratti, ma sarà intermedia fra questa e quella di fig. 12 e, precisamente, quella rappresentata in figura 13 con tratto continuo. Se la tensione anodica rimanesse costante a questo valore minimo, la traiettoria seguita dall'elettrone sarebbe quella indicata in fig. 14, con linea a tratti. Ma, siccome il valore della tensione anodica crescerà per raggiungere ancora il valore massimo, tale traiettoria dovrà essere sostituita da un'altra compresa fra questa e quella di fig. 12, traiettoria che, in fig. 14, è rappresentata con tratto continuo. Ma quando un elettrone cade sull'anodo determina corrente anodica, per cui avremo corrente anodica massima quando il potenziale è minimo, e viceversa, ossia ci troveremo di fronte a una resistenza

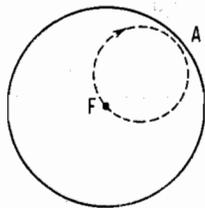


FIG. 12 - Traiettoria chiusa di un elettrone in un magnetron ad anodo intero, in corrispondenza di un determinato potenziale anodico costante V_a

differenziale negativa che manterrà in oscillazione il sistema, cedendo a esso energia. L'inesco delle oscillazioni si ottiene portando inizialmente l'intensità del campo magnetico a un valore leggermente inferiore a quello critico, aumentandolo gradatamente fino a un valore immediatamente superiore a questo.

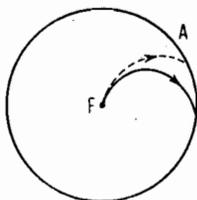


FIG. 13 - Traiettoria di un elettrone nel caso in cui la tensione anodica si mantenesse costante al valore $V_{a \max}$ (linea tratteggiata) e nel caso reale, in cui il potenziale anodico passa dal valore $V_{a \max}$ al valore $V_{a \min}$ (linea continua).

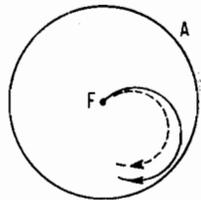


FIG. 14 - Traiettoria di un elettrone nel caso in cui la tensione anodica si mantenesse costante al valore $V_{a \min}$ (linea tratteggiata) e, nel caso reale, in cui il potenziale anodico passa dal valore $V_{a \min}$ al valore $V_{a \max}$ (linea continua).

Si deve avvisare che il funzionamento del sistema è notevolmente più complesso di quanto non appaia dalla spiegazione, del tutto intuitiva, che abbiamo data qui sopra.

Ricordando che il tempo T , che l'elettrone impiega a percorrere un giro quando il potenziale anodico è V_a e la corrente anodica è nulla, cioè in corrispondenza del valore critico dell'induzione magnetica, vale:

$$T = 0,358 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{I}{B_c}$$

e che tale tempo, sensibilmente uguale per tutti gli elettroni, determina la frequenza di oscillazione del magnetron, è facile vedere che in tal caso il prodotto dei fattori λ (lunghezza d'onda in [m] dell'oscillazione generata) e $H_c = B_c/\mu_0$ (forza magnetica di campo in [Asp/m]) è costante e uguale a 8500 unità Giorgi. In pratica si ha, invece:

$$\lambda H_c = 12.750.$$

Ricerche sperimentali hanno dimostrato che migliori risultati si ottengono inclinando di un piccolo angolo il campo magnetico rispetto all'asse del tubo.

Il circuito oscillatorio esterno non ha quasi nessuna influenza sulla frequenza generata, che dipende quasi esclusivamente dal valore dei parametri elettrici e magnetici oltre che dalle dimensioni fisiche del magnetron; esso viene regolato fino a ottenere il massimo rendimento.

2) *Magnetron ad anodo sezionato*. È pure noto sotto i nomi di *tubo Osaka* e di *tubo Posthumus* o, anche, *magnetron a campo rotante*. L'anodo è sezionato in un numero pari di

parti uguali, supponiamo quattro, collegate alternativamente in modo da formare due gruppi facenti capo a una coppia di reofori esterni, per cui, qualunque sia il numero delle sezioni dell'anodo, i collegamenti esterni relativi saranno solamente due (v. figura 15).

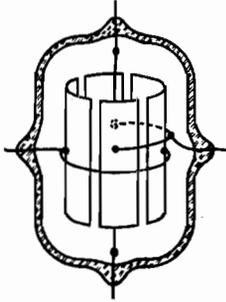


FIG. 15 - Tubo magnetron per il funzionamento secondo il principio del campo rotante.

Il circuito di impiego è schematizzato in figura 16. Come si vede, ai due gruppi di sezioni anodiche, fa capo un sistema di fili di Lecher. Il campo magnetico, agendo sempre sul reostato R , va portato a un valore leggermente superiore al valore critico B_c . Anche in questo caso, si parte dal presupposto che

il sistema sia già in oscillazione. Se V_a è il potenziale anodico, i due gruppi di sezioni anodiche, oscilleranno alternativamente fra due valori $V_{a \max}$ e $V_{a \min}$, simmetrici rispetto a V_a , per cui avremo:

$$V_{a \max} > V_a > V_{a \min}$$

Fra ogni sezione e la sezione contigua esisterà quindi, eccetto nell'istante in cui il potenziale oscillante passa per il valore zero, una d.d.p. per cui si avrà un campo elettrico particolarmente intenso in corrispondenza delle fenditure dell'anodo, le cui linee di flusso sono indicate in fig. 17. Si consideri ora un elettrone che, in un certo istante, in cui il potenziale oscillante non sia nullo, si trovi nel punto P , distante r dal filamento. Per effetto del campo, l'elettrone sarà soggetto a una forza \mathbf{E} , che potrà scomporsi in due componenti, una tangenziale \mathbf{E}_t e una radiale \mathbf{E}_r . Poichè il campo è alternativo, anche la forza agente varierà alternativamente, in modulo e senso (ma non in direzione). La componente radiale \mathbf{E}_r sarà rivolta in un semiperiodo, verso l'anodo e, nel semiperiodo successivo, verso il catodo. Anche \mathbf{E}_t varierà e sarà orientato in senso orario, quando \mathbf{E}_t è rivolto verso l'esterno e in senso anti-orario, quando \mathbf{E}_t è rivolto verso l'interno. Poichè questo ragionamento o può farsi per tutti i punti della circon-

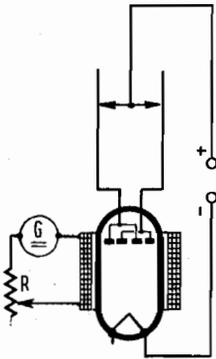


FIG. 16 - Circuito di impiego del magnetron a campo rotante.

ferenza di raggio r , il campo di \mathbf{E}_t sarà un campo elettrico rivolto in un semiperiodo in un senso e, nel semiperiodo successivo, in senso contrario, per cui detto campo sarà un campo a carattere stazionario, risultante dalla sovrapposizione di due campi progressivi, di velocità angolari, rispettivamente ω/n e $-\omega/n$, essendo ω la pulsazione che caratterizza le oscillazioni e n le coppie di sezioni in cui è suddiviso l'anodo del tubo. Il ragionamento fatto, può ripetersi per r differenti, inoltre, essendo le sezioni dell'anodo alternativamente collegate, i sensi dei campi rotanti in un certo istante, saranno quelli indicati in fig. 18 e l'intensità sarà, logicamente, massima nelle vicinanze delle fenditure, dove il campo elettrico oscillante è particolarmente intenso. Anche per le componenti radiali, può farsi il medesimo ragionamento, componenti, che saranno funzione dei campi rotanti corrispondenti. Vediamo ora l'effetto sugli elettroni che emergono dal filamento, dei due

ferenza di raggio r , il campo di \mathbf{E}_t sarà un campo elettrico rivolto in un semiperiodo in un senso e, nel semiperiodo successivo, in senso contrario, per cui detto campo sarà un campo a carattere stazionario, risultante dalla sovrapposizione di due campi progressivi, di velocità angolari, rispettivamente ω/n e $-\omega/n$, essendo ω la pulsazione che caratterizza le oscillazioni e n le coppie di sezioni in cui è suddiviso l'anodo del tubo. Il ragionamento fatto, può ripetersi per r differenti, inoltre, essendo le sezioni dell'anodo alternativamente collegate, i sensi dei campi rotanti in un certo istante, saranno quelli indicati in fig. 18 e l'intensità sarà, logicamente, massima nelle vicinanze delle fenditure, dove il campo elettrico oscillante è particolarmente intenso. Anche per le componenti radiali, può farsi il medesimo ragionamento, componenti, che saranno funzione dei campi rotanti corrispondenti. Vediamo ora l'effetto sugli elettroni che emergono dal filamento, dei due

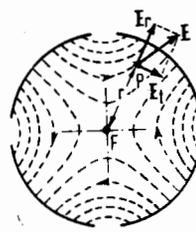


FIG. 17 - Studio del funzionamento del magnetron a campo rotante. Andamento delle linee di flusso del campo elettrico, nell'istante in cui la d.d.p. tra due sezioni anodiche adiacenti è massima.

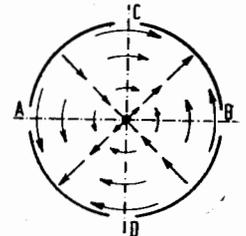


FIG. 18 - Distribuzione del campo elettrico in un magnetron a campo rotante. L'elettrone (carica negativa) cede energia al campo ogni qual volta si muove nelle direzioni segnate dalle frecce.

campi rotanti, tangenziale e radiale. Come prima cosa, è necessario ricordare che, per effetto del campo magnetico superiore al valore critico, nessun elettrone potrebbe raggiungere l'anodo.

Nell'istante in cui la d.d.p. tra due sezioni anodiche adiacenti è massima, il campo elettrico alternativo assume la configurazione illustrata in fig. 17, nella quale va notato che il modulo E_t della componente tangenziale del vettore forza elettrica di campo va diminuendo man mano che ci si avvicina al filamento. In tale istante, un elettrone che si trovi in un punto situato lungo l'asse CD di fig. 19, viene energeticamente decelerato dal componente tangenziale \mathbf{E}_t del campo elettrico prodotto dalle oscillazioni, che si sono supposte preesistere, e cede energia al campo. L'equilibrio che fin qui era esistito tra le azioni, dovute al campo elettrico e al campo magnetico e che avrebbero riportato l'elettrone sul

filamento, in assenza di oscillazioni, viene rotto. La perdita di velocità fa aumentare l'influenza del campo elettrico, per cui l'elettrone compie un nuovo balzo in avanti, avvicinandosi maggiormente alle sezioni anodiche. Così facendo l'elettrone riacquista parte

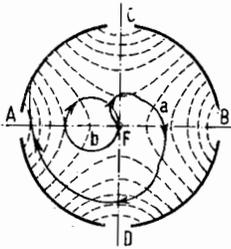


FIG. 19 - Traiettorie tipiche di elettroni che cedono energia al campo elettrico (a) e di elettroni che ne assorbono (b), in un magnetron a campo rotante.

situato lungo l'asse AB di fig. 19 esattamente quando il campo elettrico avrà invertito polarità. L'elettrone cede nuovamente energia al campo e maggiormente si avvicina alle sezioni anodiche. Il fenomeno descritto si ripete (traiettoria a in fig. 19). Nello stesso istante di cui sopra, un elettrone che si trovi leggermente a sinistra dell'asse CD , nel quadrante AC (fig. 19), viene decelerato dal componente tangenziale E_t ma contemporaneamente accelerato dal componente radiale E_r la cui azione equivale a un aumento del potenziale anodico. L'aumentata velocità che ne consegue, porta questo elettrone a raggiungere il precedente nel campo CB (fig. 19) e quindi a seguirne le sorti. Analogamente, un elettrone che si trovi leggermente a destra dell'asse CD , nel quadrante CB , viene decelerato dal componente tangenziale E_t e dal componente radiale E_r . La diminuita velocità fa sì che questo elettrone venga raggiunto, nello stesso quadrante CB , dagli elettroni che si trovano nelle condizioni sopra viste. Ne consegue un addensamento di elettroni in determinate zone radiali, i quali vengono a trovarsi nelle migliori condizioni per trasferire energia al campo oscillante.

Un elettrone che, nell'istante in cui la configurazione del campo elettrico è quella di fig. 17, si trovi, invece, in un punto situato lungo l'asse AB , viene energicamente accelerato e cade nuovamente sul catodo, dando luogo a una notevole emissione secondaria (traiettoria b in fig. 19). L'intensità della emissione secondaria è tale da permettere il funzionamento del tubo, una volta iniziato, anche con riscaldatore spento. In taluni casi

si provvede perfino a un raffreddamento forzato del catodo. Le oscillazioni, che verranno così mantenute, saranno caratterizzate da una pulsazione ω , il cui valore viene espresso mediante la relazione:

$$\omega = \frac{2n V_a}{(r_a^2 - r_c^2) B}$$

essendo $2n$ il numero delle sezioni anodiche, V_a il potenziale anodico, r_a il raggio interno della cavità anodica, r_c il raggio esterno del filamento.

Sperimentalmente, è stato dimostrato come il rendimento aumenti inclinando il campo magnetico rispetto all'asse del tubo.

In tale caso, le traiettorie elettroniche saranno spiralfornite.

Una spiegazione al fenomeno, per cui il rendimento aumenta in tali condizioni, può essere data ammettendo che gli elettroni, in corrispondenza di 360° elettrici, non ruotino attorno al catodo di 360° geometrici, ma di un ammontare leggermente differente. Di conseguenza, dopo un certo tempo il moto di un elettrone elettrico comincia a incidere passivamente, anziché attivamente sul bilancio energetico assorbendo energia, anziché cedendone. È quindi conveniente che dopo un certo numero di cicli, ogni elettrone venga eliminato. Ed è appunto con l'inclinazione del campo magnetico che si raggiunge lo scopo, in quanto le traiettorie degli elettroni diventano, come già abbiamo detto, spiralfornite a causa del sorgere di una componente della velocità, parallela all'asse del tubo. Il valore dell'angolo di inclinazione del campo è compreso fra 3° e 6° . Anziché con la inclinazione del campo magnetico, lo stesso risultato può essere ottenuto disponendo a un estremo e all'altro del filamento, simmetricamente due dischi metallici, non collegati alle sezioni anodiche, polarizzati in modo che si formi un campo elettrico assiale, tale da rendere spiralfornite le traiettorie elettroniche. L'eliminazione degli elettroni che hanno raggiunto l'estremità del tubo è evidente: essi possono, se non cadono su una sezione dell'anodo essere sbalzati fuori o essere raccolti da uno dei dischi terminali, se si ricorre al secondo espediente. Le verifiche teoriche, confermano queste ipotesi.

3) *Magnetron a cavità multiple.* Durante la seconda guerra mondiale, ha fatto la sua apparso il *magnetron a cavità multiple*, noto anche sotto il nome di *tubo di Randall-Boot*. Il tubo in questione, generalmente alimentato a impulsi, ha permesso di ottenere potenze elevatissime nel campo delle microonde. Il suo impiego ebbe particolare sviluppo nelle apparecchiature radar che tanta importanza hanno avuto nel successo delle armi alleate.

Si sono costruiti radar funzionanti su di una frequenza di 9500 MHz con potenze di oltre 100 kW, con alimentazione a impulsi di 2-30 microsecondi di durata in numero di 200-4000 per secondo. L'anodo del magnetron a cavità è costituito da un blocco cilindrico massiccio

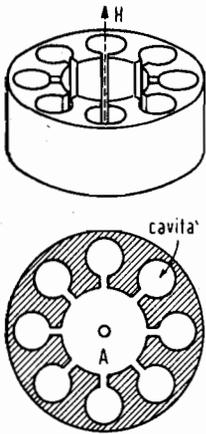


FIG. 20 - Struttura dell'anodo di un magnetron a cavità.

o lamellare, in lega di rame (v. figura 20). Lungo l'asse di un'apertura cilindrica centrale *A*, trovasi il catodo, del tipo a riscaldamento indiretto, mentre tutt'attorno, sono disposte le cavità, in numero di otto, nel tipo più moderno, le quali comunicano, attraverso strette fenditure verticali, con l'apertura cilindrica centrale. Le cavità vengono eccitate attraverso dette fenditure, mediante azione elettronica. Il catodo è del tipo a riscaldamento indiretto e ciò affinché esso sia rigorosamente equipotenziale, onde evitare perturbazioni dannose al buon funzionamento del tubo, determinate anche dal campo magnetico dovuto alla corrente di accensione del catodo qualora questo fosse ad accensione diretta (nei catodi a riscaldamento indiretto, l'inconveniente viene evitato, come è noto, ripiegando convenientemente il riscaldatore).

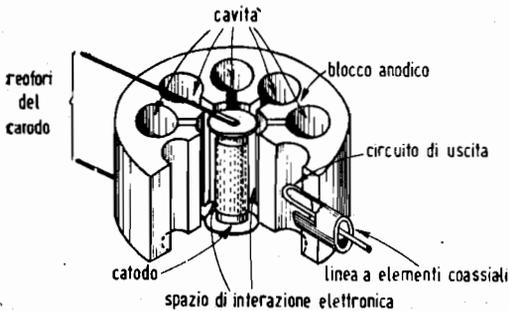


FIG. 21 - Spaccato di un magnetron a otto cavità.

Le cavità, normalmente a sezione cilindrica fessurata (fig. 20), possono anche essere realizzate in modo diverso, ad esempio a forma di fessure a larghezza costante, oppure a sezione triangolare, in questi casi in numero variabile tra 6 e 18. Talvolta le cavità possono avere dimensioni radiali alternativamente maggiori e minori, come nel magnetron tipo « Sol levante » particolarmente in-

dicato per le frequenze più elevate (oltre 10 000 MHz).

Un sistema di cavità come quello di fig. 20 può entrare in oscillazione secondo diversi « modi » cui corrispondono diversi sfasamenti tra due segmenti anodici contigui. Ad esempio, nel caso di un magnetron a 8 cavità, il sistema può entrare in oscillazione con sfasamenti relativi corrispondenti a $0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ, 180^\circ$ elettrici. Si constata sperimentalmente che questi diversi « modi » (o *regimi*) corrispondono a frequenze assai prossime le une alle altre. Sebbene gli elementi che agiscono su tali oscillazioni (tensione anodica e induzione magnetica) differiscano per ciascuna di tali frequenze, rimane il fatto che l'eccitazione dovuta all'oscillazione elettronica desiderata è sufficiente a dar

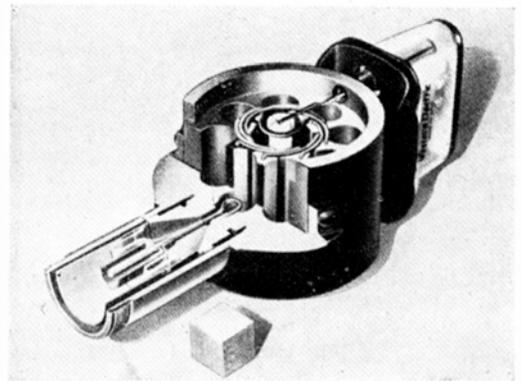


FIG. 22 - Spaccato del magnetron 5 J 23 (275 kW di cresta a 1050 MHz). Si noti lo «strapping». L'energia a RF viene prelevata mediante una piccola spira e portata all'esterno mediante un cavo a elementi coassiali. Nella foto, il cubetto dato per proporzione misura 25 mm per lato (fotografia dovuta alla cortesia dei Laboratori Bell, U.S.A.).

luogo a una oscillazione parassita su un « modo » vicino, la quale risulta particolarmente dannosa per il rendimento e la stabilità.

La presenza di oscillazioni parassite può essere notevolmente attenuata portando il magnetron a oscillare in modo che lo sfasamento tra due sezioni contigue risulti di 180° (« modo » π) e, dato che in tal caso i segmenti risultano alternativamente di polarità positiva e negativa, collegando tra loro i segmenti della stessa polarità. Tali connessioni, in numero di due, una per i segmenti positivi in un determinato istante, l'altra per quelli negativi, vengono chiamate, con termine anglosassone « straps » (= cinghie) e l'operazione relativa « strapping » (fig. 22). Lo stesso risultato si ottiene con l'uso delle cavità « Sol levante » sopraaccennate.

Il « modo » π corrisponde alla frequenza più elevata, a parità di ogni altra condizione.

Lo «strapping» accresce stabilità e rendimento in misura variabile tra il 10% e il 50%. La fig. 17 può essere assunta a rappresentare il campo elettrico alternativo, in un determinato istante, in un magnetron a quattro sezioni che oscilla secondo il «mo-

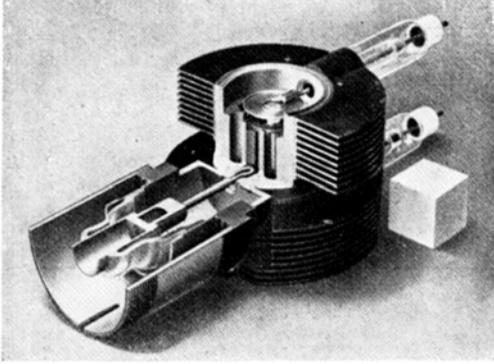


FIG. 23 - Spaccato del magnetron 720 A-E (1000 kW di cresta a 2800 MHz, con 25 kW, 70 A e una potenza di alimentazione di 1500 W). In questo tipo lo «strapping» è ottenuto mediante anelli disposti alle estremità del catodo. Nella foto, il cubetto dato per proporzione misura 25 mm per lato (foto dovuta alla cortesia dei Laboratori Bell, U.S.A.).

do» π . Il funzionamento del magnetron a cavità multiple è del tutto analogo a quello schematizzato nel punto c), 2).

Si osservi che, nel caso del magnetron a cavità, il potenziale anodico rimane costante, in quanto le oscillazioni a RF hanno sede

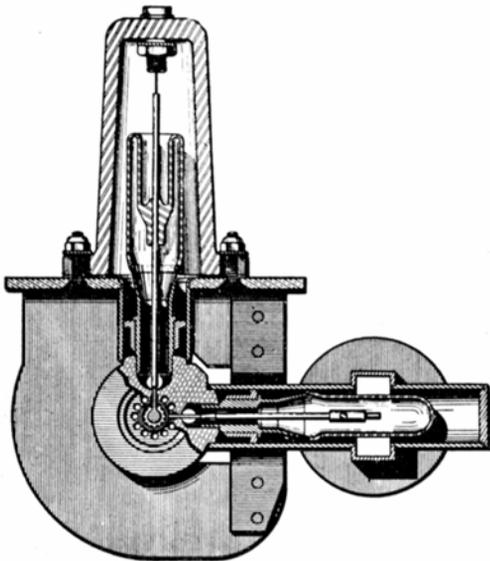


FIG. 24 - Sezione del magnetron RHK 1232 costruito dalla Compagnie Française Thomson-Houston. L'uscita è prevista per accoppiamento con guida d'onda.

nell'interno delle cavità, per cui è stato possibile, onde ottenere una elevata stabilità di funzionamento, di collegare l'anodo a massa. L'energia oscillante viene prelevata mediante una piccola spira posta nell'interno del tubo e portata all'esterno mediante una linea a elementi coassiali (v. figg. 21, 22, 23 e 24).

Per ovviare l'impossibilità di variazione della frequenza generata, che è strettamente legata alle dimensioni geometriche delle cavità, sono stati costruiti tubi a frequenza variabile. L'accordo può essere ottenuto ricorrendo a mezzi esterni, oggi pressochè abbandonati, oppure ricorrendo a sistemi interni, i quali ultimi possono essere simmetrici o asimmetrici secondo che agiscono simmetricamente su tutti gli elementi del risonatore

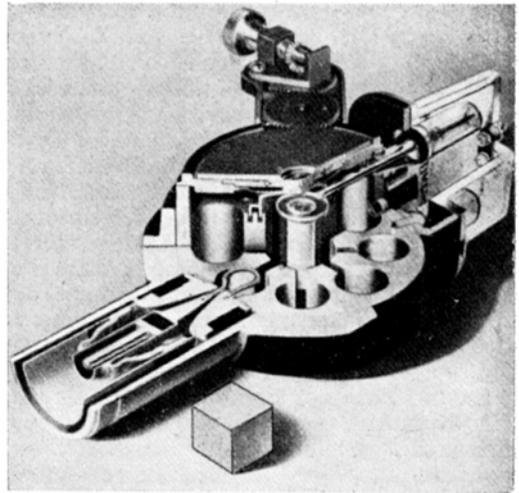


FIG. 25 - Spaccato del magnetron ad accordo regolabile 4J51 (275 kW di cresta a 900+970 MHz, con 23 kV, 20 A e una induzione di 0,11 Wb/m²). Funziona a regime impulsivo, fornendo 1000 impulsi al secondo dell'ampiezza di 1 μ sec. L'accordo è ottenuto mediante elemento mobile circolare con sezione a U, per variazione di capacità. Nella foto, il cubetto dato per proporzione misura 25 mm per lato (foto dovuta alla cortesia dei Laboratori Bell, U.S.A.).

o solamente su parte di essi. I sistemi asimmetrici presentano diversi inconvenienti, talchè sono scarsamente impiegati preferendosi i sistemi di accordo simmetrici a variazione di induttanza o a variazione di capacità.

Si può far variare simultaneamente l'induttanza di ciascuna cavità introducendo in esse un pistone metallico che riduce il volume offerto al campo in gioco, riducendo l'induttanza e aumentando conseguentemente la frequenza di risonanza. Con tale mezzo è possibile ottenere variazioni di frequenza nell'intervallo $\pm 7\%$ attorno al valore medio.

Nei magnetron a cavità cilindriche gran parte della capacità è concentrata tra le labbra delle fessure di comunicazione. In questa

regione si agisce per ottenere una variazione di capacità. Un sistema consiste nell'ottenere per tornitura due solchi concentrici nella faccia superiore del becco anodico e nel disporre di un elemento mobile circolare con sezione a U che introducendosi più o meno nei solchi suddetti fa variare la capacità del sistema risonante (fig. 25). Con questo mezzo è possibile ottenere una variazione di frequenza del $\pm 5\%$. Altro sistema consiste nel variare la capacità degli « straps ».

d) *MODULAZIONE DEL MAGNETRON*. Per quanto riguarda l'impiego del tubo incontrato nel punto b), 1), tutti i sistemi di modulazione impiegabili nel caso del triodo, ad eccezione della modulazione di griglia, sono utilizzabili. Per l'impiego del tubo incontrato al punto b), 2), si hanno risultati buoni modulando per variazione di tensione anodica, da realizzarsi però seguendo opportuni accorgimenti cui non accenniamo. Tale sistema di modulazione è invece sconsigliabile per l'impiego del magnetron secondo

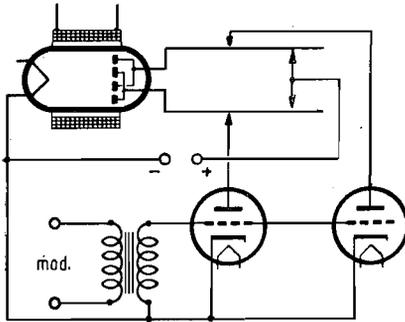


Fig. 26 - Circuito modulatore per magnetron.

quanto abbiamo esposto al punto c), in quanto la modulazione di ampiezza sarebbe accompagnata da considerevole modulazione di frequenza. Sono stati sperimentati tubi magnetron con griglia di controllo onde agire con la modulazione su questo elettrodo, ottenendo risultati discreti. Altro tipo di modulazione consiste nell'agire sul campo magnetico. Buoni risultati sono stati ottenuti seguendo la disposizione di fig. 26, impiegando due triodi alle cui griglie viene applicata la tensione modulante.

e) *ECCITAZIONE A IMPULSI DEL MAGNETRON*. L'eccitazione a impulsi ha particolare importanza per il magnetron a cavità. La tensione impulsiva viene applicata al catodo e, dovendo corrispondere a una tensione positiva anodica, sarà logicamente negativa. La durata dell'impulso, come già più sopra abbiamo detto, sarà di 2-30 micro-secondi, mentre il numero degli impulsi sarà di 200-

4000 al secondo. La forma di ogni singolo impulso dovrà essere il più possibile rettangolare, onde rendere minima e praticamente nulla la presenza di frequenze parassite. Indicando con V_{ac} la tensione di eccitazione del tubo, V_{ao} la tensione in assenza di impulso e V_i la tensione di impulso in valore assoluto, dovrà essere:

$$V_{ao} + V_i \geq V_{ac},$$

affinchè l'eccitazione possa aver luogo ed anche:

$$V_{ao} < V_{ac},$$

affinchè, in assenza di impulso, le oscillazioni cessino.

1) *MAGNETRON RIVELATORE*. Il magnetron ad anodo intero può servire come rivelatore nei circuiti ricevitori, in modo particolare per quanto concerne quelli relativi alle microonde.

Il principio è basato sul fatto che in corrispondenza dell'induzione critica B_c , gli elettroni sfiorano l'anodo. Le cose vanno disposte in modo che la distanza traiettoria elettronica-anodo sia minima. È evidente come sovrapponendo alla tensione anodica V_a una tensione oscillante, le semionde positive determinano un aumento del raggio dell'orbita, aumento che causerà la caduta dell'elettrone sull'anodo e la conseguente formazione di corrente anodica, mentre, le semionde negative, determinano una diminuzione di detto raggio, per cui nessun elettrone raggiungerà l'anodo. In fig. 27 abbiamo rappresentato le varie fasi del fenomeno, in a) in assenza di segnale oscillante applicato, in b) in corrispondenza di una semionda positiva, in c) in corrispondenza di una semionda negativa. Il meccanismo dell'azione rivelante è più che mai evidente.

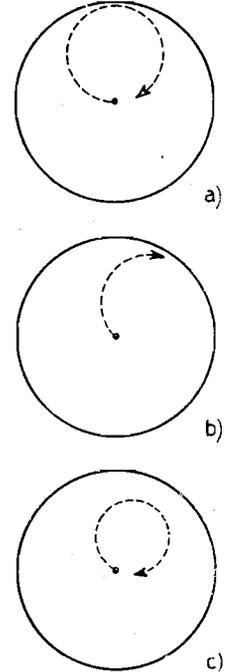


Fig. 27 - Meccanismo della rivelazione mediante un magnetron ad anodo intero.

MAILLECHORT [metallurgia]. Lega di rame (62%), zinco (22%) e nichel (16%) utilizzata nella fabbricazione di resistori e reostati. Alla temperatura normale presenta resistività di $30 \mu\Omega\text{cm}$.