

受信真空管の入力アドミタンスの測定

Measurement of Input Admittance of Receiving Tubes at Ultra High Frequency

伊藤 久* 星野 文雄*
Hisashi Ito Fumio Hoshino

内容梗概

数十メガサイクル以上の高い周波数域では真空管の入力アドミタンスがその動作に大きな影響を及ぼすようになる。

このたび微小入力に対する短絡入力アドミタンス測定器を製作し、各種の受信管について測定を行った。本稿はその測定結果報告である。

1. 緒言

真空管の動作を定量的に取扱うために、いわゆる三定数などのパラメータと適当な等価回路との組み合わせが用いられる。周波数が次第に高くなって10~100 Mc程度以上になると、真空管の外部端子(ベースピン、キャップなど)に現われている電圧または電流と、真空管の実際の電極そのものに現われている電圧、電流とを等しいとみなすことができなくなるほか、入力アドミタンスにコンダクタンス成分が生じ、入力電圧と出力電流の間に位相差を生ずるようになる。これはリード線のインダクタンス、電極間静電容量、電子走行時間の効果、放射そのほかの損失などの総合効果によるものである。

このような高い周波数域では、真空管を一つの四端子網と考えてそのパラメータを扱うのが実際的である。第1図は四端子網として表わした真空管の等価回路を示し、(1)式はこの回路の方程式を短絡アドミタンスパラメータを使って表わしたものである。

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= y_{11}v_1 + y_{12}v_2 \\ i_2 &= y_{21}v_1 + y_{22}v_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここに

- y_{11} : 短絡入力アドミタンス
- y_{12} : フィードバックアドミタンス
- y_{21} : 相互アドミタンス
- y_{22} : 短絡出力アドミタンス

である。このうち y_{11} は高周波領域での真空管の動作にとって特に重要である。

2. 受信真空管の短絡入力アドミタンス

比較的低い周波数では入力アドミタンスはほぼ純サセプタンス分だけから成るとみなすことができる。しかし次第に周波数が高くなるにつれてコンダクタンス成分をも示すようになる。この原因としては

- (1) カソード グリッド間あるいはグリッド プレート間の電子走行時間の効果
- (2) カソードその他の電極のリードのインダクタンスの効果
- (3) 表皮効果によるリードの抵抗増加の効果
- (4) 誘電体損失や放射損失による効果

などがある。現在普通に用いられているつまみシステムやボタンステムの受信管では上記のうち(3), (4)の影響は(1), (2)に比較して小さい。

2.1 電子アドミタンス

微小入力信号に対する短絡入力アドミタンスのうち電子走行時間効果にもとづく入力アドミタンス分すなわち電子アドミタンスは平

行平面電極三極管では(2)式のように表わされる⁽¹⁾。ただしすべての電子の初速度は0であり、かつカソードの面と平行な方向の速度成分は0であると仮定する。

$$y_e = g_m \left[\frac{Y_4(j\omega\tau_1)}{Y_6(j\omega\tau_1)} - \frac{Y_3(j\omega\tau_1)Y_3(j\omega\tau_2)}{Y_6(j\omega\tau_1)} \right] \dots\dots\dots(2)$$

ここに τ_1, τ_2 はそれぞれカソード グリッド間およびグリッド プレート間の電子走行時間であり、また

$$Y_3(\alpha) = \frac{2}{\alpha^2} (1 - e^{-\alpha} - \alpha e^{-\alpha})$$

$$Y_4(\alpha) = \frac{6}{\alpha^3} [\alpha - 2 + (\alpha + 2)e^{-\alpha}]$$

$$Y_6(\alpha) = \frac{12}{\alpha^4} \left[\frac{\alpha^3}{6} - \alpha + 2 - (\alpha + 2)e^{-\alpha} \right]$$

である。 $\omega\tau$ が1よりも小さい範囲では(2)式は(3)式のようになる⁽¹⁾。

$$y_e \doteq \frac{g_m \omega^2 \tau_1^2}{20} \left[1 + \frac{44}{9} \frac{\tau_2}{\tau_1} + 5 \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^2 \right] + \frac{j\omega\tau_1 g_m}{6} \left(1 + 4 \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \dots\dots(3)$$

5極管では、スクリーングリッドをプレートと考え、 g_m としてカソード電流に対する値をとればよい。

2.2 リードインダクタンスの効果

カソードリードおよびプレートリードのインダクタンスは入力アドミタンスの一つの原因になる。今第2図のようにプレートおよびカソードリードにインダクタンスがあると、カソード接地形増幅器としての入力コンダクタンスは(4)式のようになる⁽⁴⁾。

$$g_L = \omega^2 (L_k C_1 - L_p C_2) g_m \dots\dots\dots(4)$$

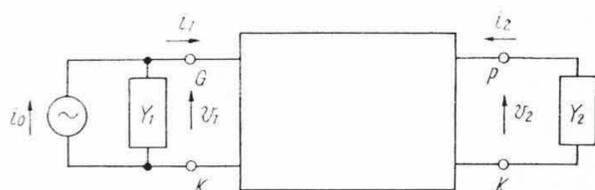
ただし電子走行時間を無視し、

$$\omega \ll \frac{1}{\sqrt{L_k C_1}}, \quad \omega \ll \frac{1}{\sqrt{L_p C_2}}, \quad \omega C_1 \ll g_m$$

と仮定した。また5極管の場合には L_p がスクリーングリッドリードのインダクタンスを、 C_2 がスクリーングリッド・コントロールグリッド間の容量を表わし、第2項に対してはスクリーングリッド電流に対する g_m を用いる必要がある。

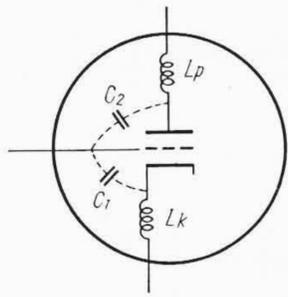
3. 入力アドミタンス測定器

入力アドミタンスの測定方法にはいろいろのものが提案されてい

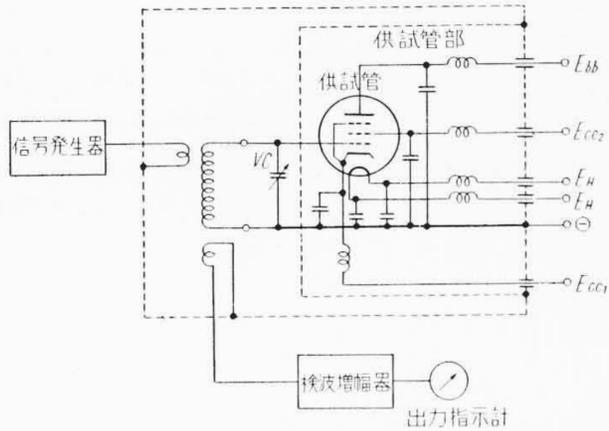


第1図 四端子網として表わした真空管の等価回路

* 日立製作所茂原工場



第2図 カソードリードおよびプレートリードインダクタンス



第4図 短絡入力アドミタンス測定器の原理図

第1表 短絡入力アドミタンス測定器のおもな性能

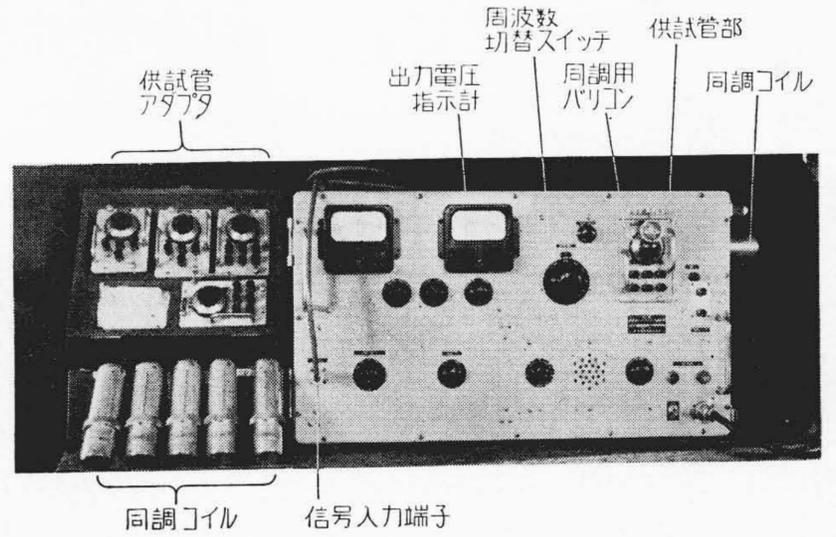
測定周波数	30, 50, 100, 150, 200, 250 Mc
入力コンダクタンス測定範囲	25~1,000 μS
入力コンダクタンス確度	±20%以内
入力キャパシタンス測定範囲	1~15 pF
入力キャパシタンス確度	±(10%+0.3 pF)以内
測定受信管品種	6AK5, 6CB6, 6R-R8, 6BQ7-A (各ユニット)およびこれらと同様のピン接続を有する受信管

るが、集中定数回路を利用できるのはせいぜい200~300 Mc程度までで、それ以上になると分布定数回路を使う必要がある。

今回製作した入力アドミタンス測定器はサセプタンス変化法を利用したもので、容量置換法によって入力キャパシタンスも測定することができる。第3図にその外観を示す。

測定原理は次のとおりである(第4図参照)。信号発生器の出力を粗結合の電磁結合によって供試管グリッドの同調回路に供給し、次に定義するような $\Delta C, \Delta C'$ を測定する。

ΔC : 供試管をソケットにさし、規定の条件で動作させてバリコン VC を同調点の前後に変化させ、同調回路の共振出力電圧が同調点の両側でそれぞれ同調点の値の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ になる時の VC



第3図 短絡入力アドミタンス測定器の外観

の変化分

$\Delta C'$: 供試管をソケットからはずし、上記と同じ操作をした時の VC の変化分

そのとき、供試管の入力コンダクタンスは(5)式で与えられる。

$$g_{in} = \frac{1}{2} \omega (\Delta C - \Delta C') \dots \dots \dots (5)$$

また入力キャパシタンスは供試管をソケットにさした時とはずした時の同調点の変化で求められる。

本測定器のブロックダイアグラムを第5図に、また主要性能を第1表に示す。

この測定器のおもな特長を説明する。

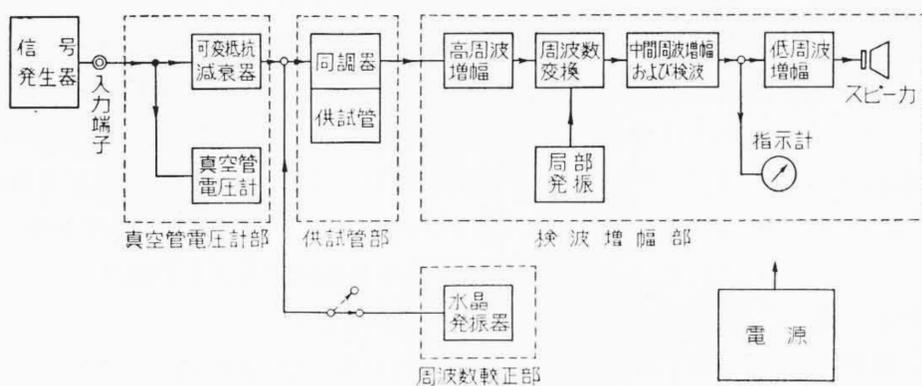
周波数によって供試管グリッドの同調回路を構成するインダクタンスをさしかえるようになっている。インダクタンスは一端短絡の同軸線路を用い、低い周波数では中心導体に固定のインダクタンスを付加してある。検波増幅部は、ターレットチューナによって周波数を選ぶ。

入力コンダクタンスは周波数によって大きく変化するから、測定周波数を正確におさえる必要がある。そのため、水晶発振器を自蔵し、その高調波と入力信号とのビートをとって周波数を確認するようにした。

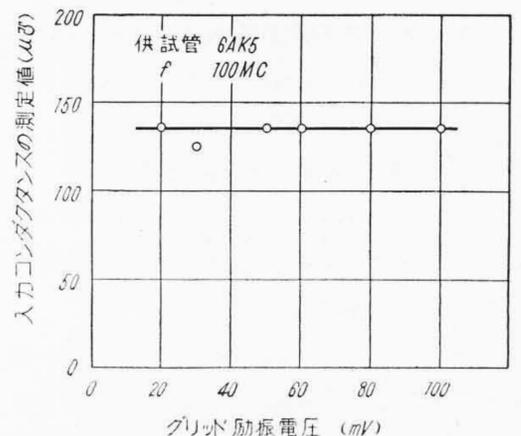
測定にあたっては、共振出力電圧を $\frac{1}{\sqrt{2}}$ にする代わりに信号入力を $\sqrt{2}$ 倍にして共振出力電圧がもとと同じ値になる点を測定することにした。これは測定中供試管グリッドに加わる励振電圧をなるべく一定値に保つためである。

4. 測定例

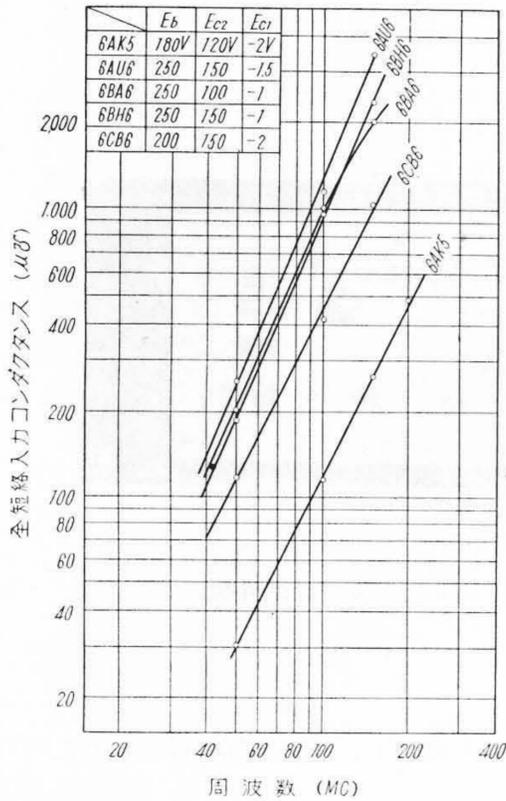
本測定器を使って測定した結果の中からおもなものを抜粋して参考に供する。



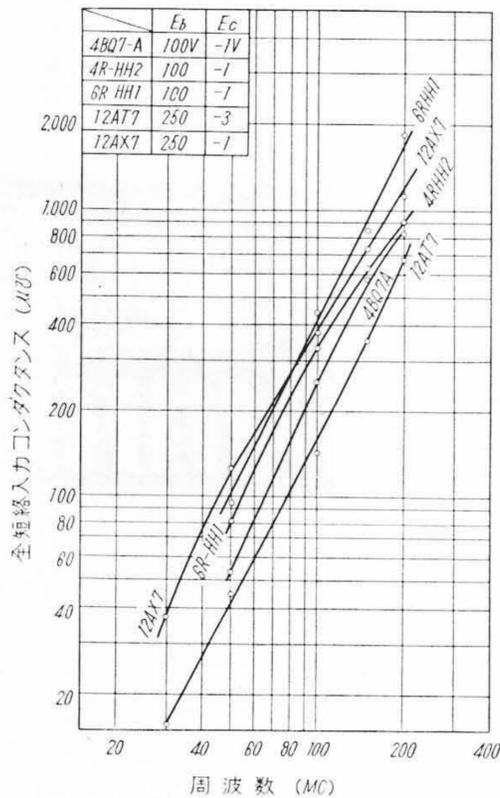
第5図 短絡入力アドミタンス測定器のブロック図



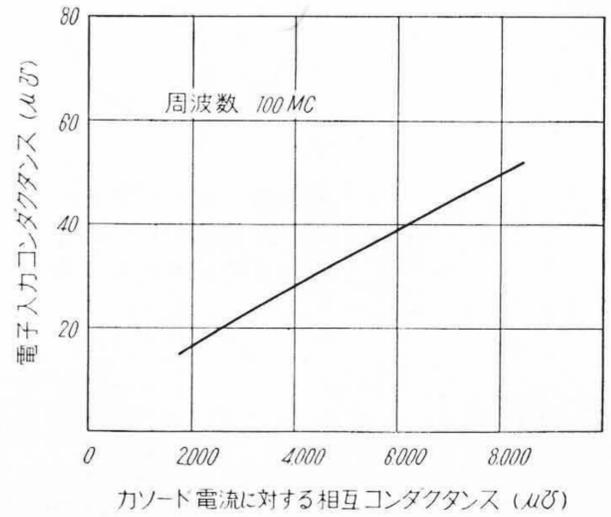
第6図 入力信号の大きさが入力コンダクタンスの値に与える影響



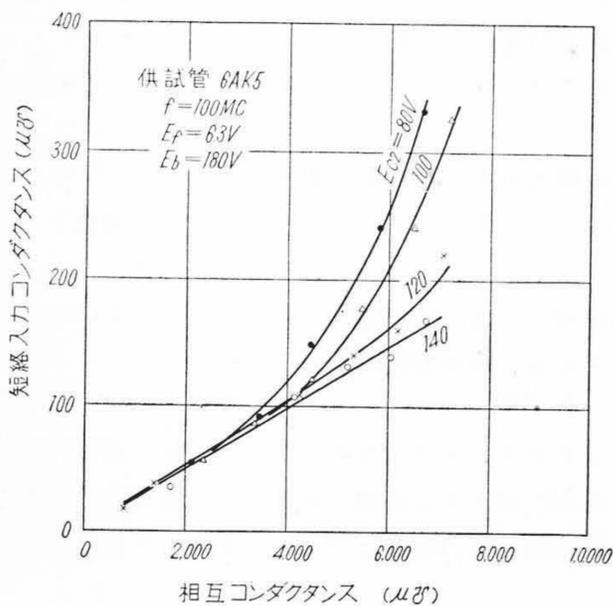
第 7 図 短絡入力コンダクタンスの周波数特性 (1)



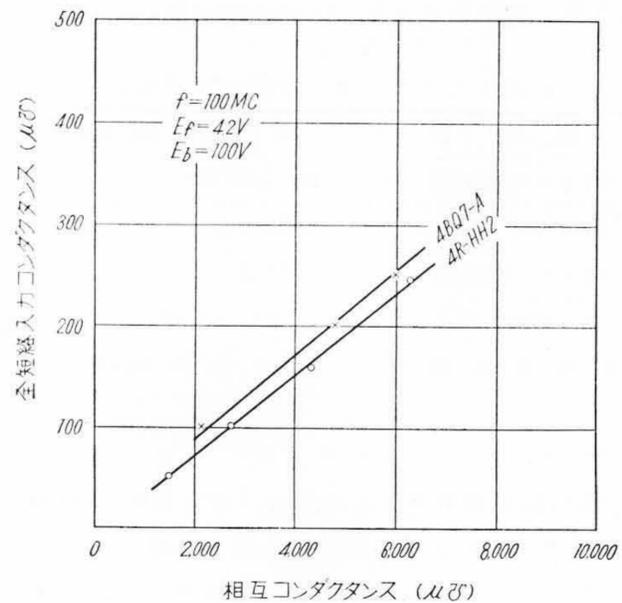
第 8 図 短絡入力コンダクタンスの周波数特性 (2)



第 9 図 (3) 式で計算した 6AK5 の g_m と電子入力コンダクタンスとの関係



第 10 図 短絡入力コンダクタンスと g_m との関係 (1)



第 11 図 短絡入力コンダクタンスと g_m との関係 (2)

4.1 入力信号の大きさ

入力信号の大きさが測定結果に及ぼす影響を 6AK5 について調べた一例を第 6 図に示す。これでもわかるように、一般に入力信号の大きさが 100 mV 程度以下であれば微小信号とみなして差つかえない。

4.2 入力コンダクタンスの周波数特性

入力コンダクタンスの周波数特性の例を第 7, 8 図に示す。これらはいずれも先にあげた各種の成分を総合した全入力コンダクタンスの値であって、ほぼ二乗特性を示している。

4.3 入力コンダクタンスと g_m との関係

電子入力コンダクタンスおよびリードインダクタンスにもとづく入力コンダクタンスがそれぞれ g_m にほぼ比例することは (3) 式または (4) 式から明らかである。

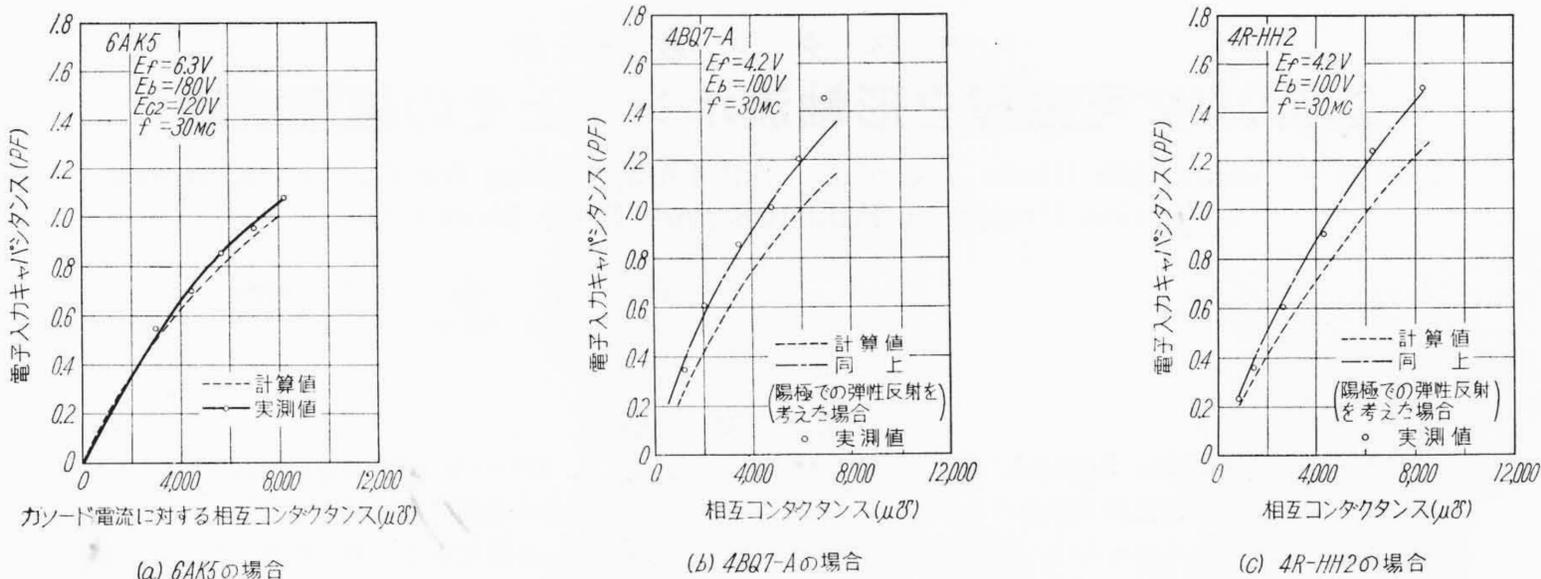
電子入力コンダクタンスは (3) 式の右辺第一項で表わされる。動作点を変えると電子走行時間 (おもに τ_1) も変化するので、厳密には g_m と単純な比例関係にはない。しかしこの影響は比較的小さく、実際上ほぼ比例関係が成立すると考えることができる。試みに 6A

K5 をとり上げて電極寸法および動作条件から電子走行時間を求め、電子入力コンダクタンスと g_m との関係を計算してみると第 9 図のようになり、上記の事実が確認される。

供試管の動作点を変えて、 g_m と全入力コンダクタンスの関係を測定した結果を第 10, 11 図に示す。なお第 10 図にはカットオフにおける入力コンダクタンスの値を引いた値を示してある。第 10 図で g_m が高くなると直線関係からはずれてくるのは、グリッドバイアスが浅くなって、初速度電流が流れてコンダクタンス分を生ずるためである。このことはスクリーングリッド電圧を変えると、直線関係からはずれる点が順次移動すること、その点に相当するグリッドバイアスの値がほぼ一定で $-1 \sim -2V$ であることなどで明らかである。第 11 図で全入力コンダクタンスと g_m とはほぼ比例しており、これによっても誘電体損失や放射損失などに起因するコンダクタンス成分が比較的小さいことがわかる。

電子走行時間の計算は次の (6) 式および (7) 式によった⁽³⁾。

$$\tau_1 = \left(\frac{6m\epsilon_0}{e} \right)^{\frac{1}{3}} d_1^{\frac{1}{3}} i^{-\frac{1}{3}} \text{ (s)} \dots \dots \dots (6)$$



第12図 電子入力キャパシタンスと g_m との関係

$$\tau_2 = \frac{2d_2}{\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2} (\sqrt{E_p} + \sqrt{V_g})} \quad (s) \dots\dots\dots (7)$$

ここに

- m : 電子の質量 ($9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$)
- e : 電子の電荷の絶対値 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)
- ϵ_0 : 真空の誘電率 (8.86×10^{-12})
- d_1 : カソードグリッド間距離 (m)
- d_2 : グリッドプレート(第2グリッド)間距離 (m)
- i : 電流密度 (A/m^2)
- E_p : プレート(第2グリッド)電圧 (V)

また

$$V_g = \left[1 + \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{d_2}{d_1} \right)^{4/3} \right]^{-1} \left(\frac{E_p}{\mu} + E_g \right) \quad (V)$$

ただし

- E_g : グリッド電圧 (V)
- μ : 増幅率

である。なお d_1 および d_2 は、カソード前面におけるカソードグリッド間の最大距離を基準とし、電子の初速度は0であるとした。(6)式でわかるように d_1 は三分の一乗できくので、カソードの前面に電位の極小点ができるのを無視しても誤差は比較的小さくすむ。

4.4 入力キャパシタンスと g_m との関係

真空管の入力キャパシタンスは、動作状態では冷状態の時に比べて若干増加する。これは一部分はカソードの見かけの膨脹によるもので、残りは電子入力キャパシタンスによるものである。後者は(3)式の右辺第二項で与えられ、 $\omega\tau$ が1よりも小さい範囲では周波数には無関係である。

真空管の g_m と電子入力キャパシタンスとの関係を調べた結果を第12図に示す。測定はリードインダクタンスの影響をさけるためできるだけ低い周波数で行った。縦軸は、真空管のヒータを点火し電流をカットオフの状態にした時の入力キャパシタンスの値からの増加分を示す。図には(3)式によって計算した理論値を一緒に示してあるが、特に6AK5の場合両者はよく一致している。

プレートで弾性衝突によって反射されてふたたびグリッドの近くまでもどってくる電子があると、電子入力アドミタンスは(3)式よりもさらに増加して(8)式のようになる⁽⁴⁾。

$$y_e \doteq \frac{g_m \omega^2 \tau_1^2}{20} \left[1 + \frac{44}{9} \frac{\tau_2}{\tau_1} + 5 \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^2 \right] + r g_m \omega^2 \tau_1^2 \left[\frac{67}{120} + \frac{1}{\sigma} + \frac{112}{45} \frac{\tau_2}{\tau_1} + \frac{8}{3} \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^2 \right] + \frac{j\omega\tau_1 g_m}{6} \left(1 + 4 \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) + j r g_m \omega \tau_1 \left[\frac{1}{2} + \frac{4}{3\sigma} + \frac{4}{3} \frac{\tau_2}{\tau_1} \right] \dots\dots\dots (8)$$

ただし r はプレートで反射する電子の入射電子に対する割合であり、また

$$\sigma = \left[1 + \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{d_2}{d_1} \right)^{4/3} \right]^{-1}$$

である。 r はプレート電圧が高いほど小さくなるが、普通2~3%といわれる⁽⁴⁾。第12図では、三極管である4BQ7-A および4R-HH2の場合に $r=3\%$ として(8)式によって計算した理論値をも一緒に示した。反射を考えると実測値と理論値が非常によく一致することがわかる。

5. 結 言

以上今回製作した測定器の紹介およびそれを使って得られた測定結果を報告した。

今後の問題としては、絶対校正、測定周波数の拡大、四端子アドミタンスの測定器製作などが残されている。

なお本測定器を製作するに当り東京大学工学部岡村教授にご助言をいただいた。また実際の製作には安藤電気株式会社の絶大なご協力をいただいた。ここに厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) W. E. Benham & I. A. Harris: The UHF Performance of Receiving Valves. p.55~63 (1957 Macdonald & Co.)
- (2) 同上 p.17~19
- (3) 同上 p.35, p.47
- (4) 同上 p.84, p.94