

トランジスタの高周波特性のバイアスによる変化

—ゲルマニウムメサ型トランジスタについて—

真 鍋 幸 夫

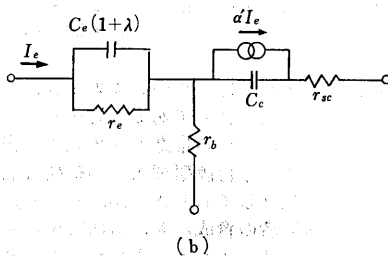
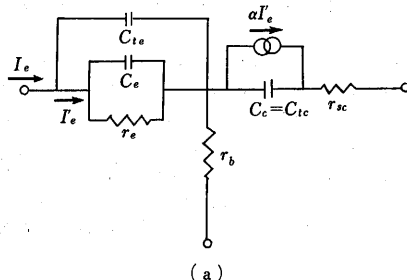
各種のゲルマニウムメサ型トランジスタの高周波 h 定数を、周波数とバイアス条件を変えて測定したが、本文では、その結果を整理し、おもにバイアス変化特性につき考察した。すなわち高周波トランジスタの周波数特性曲線は、周波数が高くなると寄生素子（マウントのリード・インダクタンスや漂遊容量）の影響をうけて大幅に変形するが、バイアス特性曲線に及ぼすこの寄生素子の影響は一様であるため、バイアス特性を考察することは、トランジスタの高周波特性を解析するときにもきわめて重要である。本文では、T型等価回路を基礎にして、エミッタ電流およびコレクタ電圧を変化したときの、各 h 定数の変化曲線を算出し、実験結果と比較してある。また、バイアス変化を利用して知り得た寄生素子の影響についても簡単に述べてある。

1. 等価回路と h 定数

第1図は、高周波トランジスタのT型等価回路である（メサ型ではその構造と対比して一部修正して用いることもある）。図において、 r_e = エミッタ拡散抵抗、 C_e = エミッタ拡散容量、 C_{te} 、 C_{tc} = エミッタ、コレクタ障壁容量、 r_b = ベース抵抗、 r_{sc} = コレクタ飽和抵抗、 α = 高周波電流増幅率で、 $r_e = kT/qI_e$ (k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度、 q : 電子の電荷量、 I_e : エミッタ電流)、 $r_e C_e = 1/\omega_\alpha$ の関係があり、

$$\alpha = \alpha_0 \exp(-jm\omega/\omega_\alpha) / (1 + j\omega/\omega_\alpha)$$

で近似される。（ただし、 α_0 = 低周波電流増幅率、 ω_α = ベース接地電流増幅率遮断角周波数、 m = 過剰位相推移である）。



第1図 T型高周波等価回路

ここで、 C_{te} を流れる電流は多数キャリア電流で、コレクタ電流には寄与しないから、(b)図のように書きかえると、等価的に、

$$\alpha' = \alpha \{1 + j(\omega/\omega_\alpha)\} / \{1 + j(\omega/\omega_\alpha)(1 + \lambda)\} = \alpha_0 \exp$$

$$(-jm\omega/\omega_\alpha) / \{1 + j(\omega/\omega_\alpha)(1 + \lambda)\}$$

となる。

ただし、

$$\lambda = C_{te}/C_e$$

第1(b)図から、ベース接地 h 定数を計算すると、つぎのようになる。ただし、まず $r_{sc} = 0$ とする。

$$h_{11} = \frac{r_e}{1 + j\omega(C_e + C_{te})r_e} + r_b \frac{1 - \alpha'}{1 + j\omega C_e r_b} \\ = \frac{\lambda}{\omega_\alpha C_{te} 1 + j(\omega/\omega_\alpha)(1 + \lambda)} + r_b \frac{1 - \alpha'}{1 + j\omega C_e r_b} \quad (1)$$

$$h_{21} = -\frac{\alpha' + j\omega C_e r_b}{1 + j\omega C_e r_b} \quad (2)$$

$$h_{12} = \frac{r_b}{r_b + (1/j\omega C_e)} \quad (3)$$

$$h_{22} = \frac{1}{r_b + (1/j\omega C_e)} \quad (4)$$

いま、 Z_e = エミッタインピーダンス ((1) 式の第1項) とすれば、

$$h_{11} = Z_e + r_b(1 + h_{21}) \quad (5)$$

$$h_{12} = r_b h_{22} \quad (6)$$

の関係がある。

ここで、 r_b 、 ω_α は周波数にもバイアス条件にも依存しない定数とし、 α_0 も一応定数と考え、コレクタ電圧 V_c に依存するのは C_e のみとし、エミッタ電流 I_e によって変化するのは r_e および C_e が主体で、 C_{te} は電流がきわめて小さいときを除き、ほぼ一定であるから、これを定数と見なすと、(1)~(4)式において、 I_e の関数は λ 、 V_c の関数は C_e だけであり、

$$\lambda \propto 1/I_e, \quad C_e \propto 1/\sqrt[3]{V_c + \phi} \quad (\phi: \text{接合電位差})$$

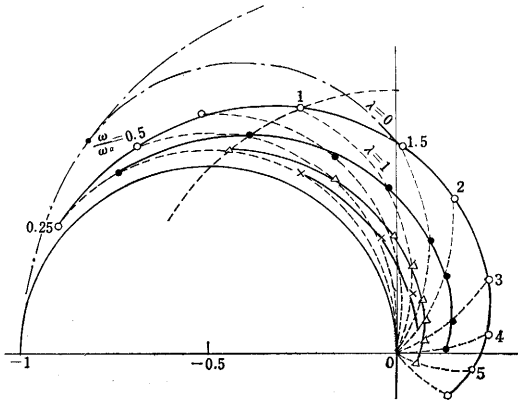
である。

2. エミッタバイアス電流による h 定数の変化

(1) および (2) 式が λ を含むから、 h_{11} および h_{21} が I_e による変化をうけることになる。

(a) h_{21}

C_e が十分小さいときは、



第 2 図 h_{21} の周波数およびエミッタバイアス電流による変化 ($r_b C_c \ll 1$ のとき)

$$h_{21} \doteq -\alpha' = -\alpha_0 \frac{\exp(-jm\omega/\omega_a)}{1+j(1+\lambda)\omega/\omega_a}$$

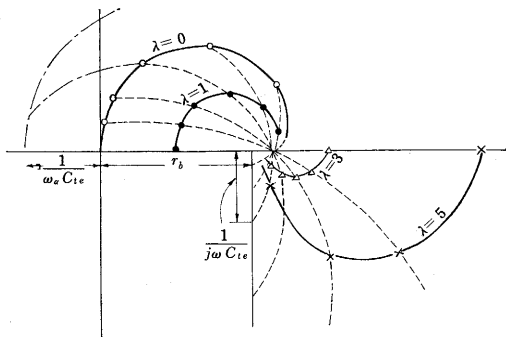
したがって、 ω —一定の下で λ が $\lambda=0 (I_e=\infty)$ から $\lambda=\infty (I_e=0)$ まで変化すると、 h_{21} は、線分 $\{0, -\alpha_0 \exp(-jm\omega/\omega_a)\}$ を直径とする円上を、 $-\alpha$ から 0 まで移動する (ω に対応してそれぞれの円弧が存在する)。第 2 図は、 $\alpha_0=1, m=0.4$ とした場合について図示してある。図において、実線は周波数特性を、点線はエミッタバイアス特性 (I_e 特性) を表わしている。これによって、 I_e が小さく (λ が大きく) になると、エミッタ障壁容量を考慮に入れたときの電流増幅率は絶対値が小さく位相遅れが大きくなり、低い周波数でも 0 に近づくことがわかる。なお C_{te} が一定でなくても I_e 特性は円弧になる。

(b) h_{11}

C_c が小さく、 $C_c r_b \ll 1$ であれば、(1) 式から、

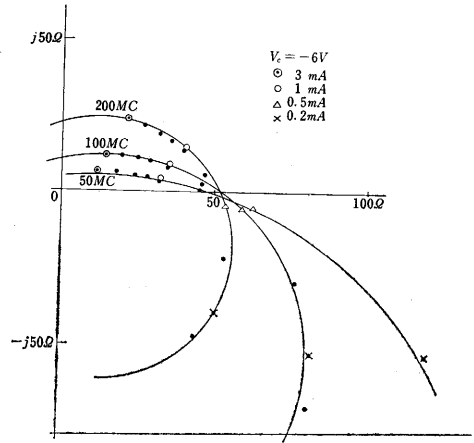
$$h_{11} = r_b + \frac{\lambda/\omega_a C_{te} - r_b \alpha_0 \exp(-jm\omega/\omega_a)}{1+j(1+\lambda)\omega/\omega_a}$$

となり、 λ を 0 から ∞ まで変化したときの h_{11} の軌跡は、線分 $(r_b + 1/j\omega C_{te}, -1/\omega_a C_{te}) + r_b \{ -\alpha_0 \exp(-jm\omega/\omega_a) \}$ を直径とする円のうち、 $(1-\alpha) r_b$ と $r_b + (1/j\omega C_{te})$ の



第 3 図 h_{11} の周波数およびエミッタバイアス電流による変化

点線は 周波数変化
実線は エミッタ電流変化



第 4 図 h_{11} のエミッタ電流による変化 (M 8128 No. 1)

間の部分となる。周波数を上げてゆくと、円の直径は小さくなり、円弧の中心角も減少し、円弧は短くなる。第 3 図にこの変化の様態を示してある。図において、実線は I_e 一定のときの周波数特性、点線は ω 一定の下での I_e 特性である。なお、 C_{te} が小さくなれば、 h_{11} の I_e 特線 (図の点線) は直線に近づく。第 4 図には実測結果を図示してあるが上の考え方が妥当であることを示している。ただし細かく観察すると完全な円にはならないが、これは α_0 が定数でないことや、 C_{te} が I_e の小さいところで変化するためと考えている。

(c) h_{12}, h_{22}

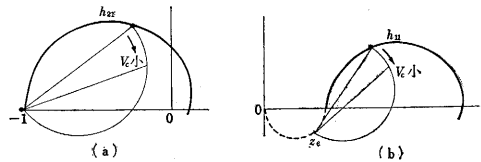
これらは (3), (4) 式で考える限り I_e の影響をうけない。

3. コレクタ電圧による変化

コレクタ電圧を変えたとき、 C_c のみが変化するという仮定は、メサ型トランジスタの場合十分成立し、コレクタが grade 接合であるから、前述のように $C_c \propto 1/\sqrt{V_c + \phi}$ となる。したがって C_c の変化率は実際にはそれほど大きくはない。

(a) h_{21}

ω および I_e を一定にして、 C_c を変化 (V_c を変化) したとき、 h_{21} は (2) 式から、 $-\alpha'$ と -1 を直径の両端とする円周上を移動し、 C_c が大きくなるほど、 $-\alpha'$ から離れる (第 5 図 (a) 参照)。 -1 から見た回転角は、 $\tan^{-1} \omega C_c r_b$ で ω とともに増加し、また $1-\alpha'$ もほぼ ω とともに大きくなるから、 h_{21} の変化は ω が大きいほど大となる。また ω 一定ならば、 $C_c r_b$ の大きい



第 5 図 h_{21} および h_{11} 曲線のコレクタ電圧による変化

ほど変化が大きい。 r_{sc} が存在するとき、回転の中心は $-r_b/(r_b+r_{sc})$ となる。実際には、 ω がよほど高くない限り、 V_e による h_{21} の変化は小さい。その理由は V_e の最大許容値から C_{emin} が決まり、実用上あるいは測定上の最小コレクタ電圧から C_{emax} が決まるが、この比 C_{emax}/C_{emin} があまり大きくはないからである。

(b) h_{11}

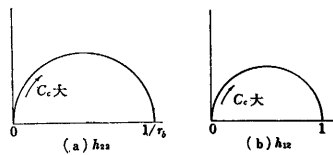
Z_e は C_e を含まぬから、 h_{11} の C_e (または V_e) による変化模様は、(5)式が示すように h_{21} の変化と密接な関係があり、 Z_e と $Z_e+r_b(1-\alpha')$ を直径の両端とする半円上を第6図(b)のように移動する。その変化分は h_{21} の変化分の r_b 倍である。

(c) h_{22}

C_e 変化による h_{22} の軌跡は(4)式から、第6図(a)のように、周波数特性と同じ半円になる。

(d) h_{12}

h_{12} の変化は(5)式から、 h_{22} と相似な変化をすることが予想される(第6図(b))。



第6図 h_{22} , h_{12} のコレクタ電圧による変化

4. 測定結果との比較

以上の、等価回路から導かれた結論を Transfer Function and Immittance Bridge による測定結果と比較してみる。

第7図にはメサトランジスタ 2SA 276 のベース接地 h 定数特性曲線測定結果をかかっている。実線は周波数特性、点線はエミッタバイアス電流特性曲線で、周波数は 100Mc を単位としている。

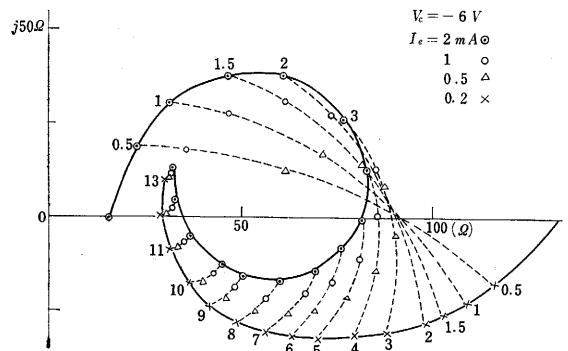
(a) h_{11}

I_e 特性曲線(第7図(a)の点線)はほぼ円弧となっており、上述の考察が妥当であることを裏書きしている。図の点線が約 90 Ω の点で横軸を切っているから、第3図と比較して、 r_b はこの程度の大きさと想像される。

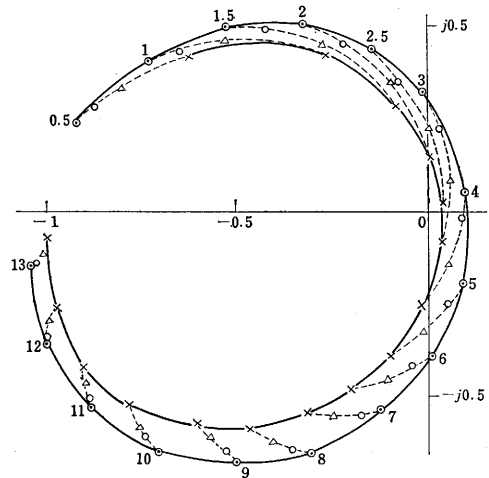
h_{11e} の測定から求めた r_b は 80 Ω であった。また、周波数特性曲線は周波数が高くなると r_b の近くに集まらず、左へずれるが、これはつぎに述べる h_{21} の変化模様から説明できる。

(b) h_{21}

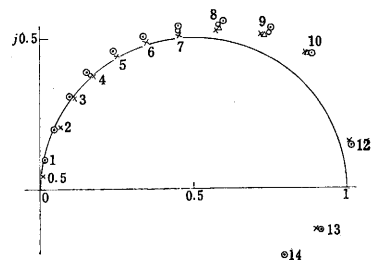
h_{21} の I_e 特性は、第7図(b)に示すように、周波数が低いときには $I_e \rightarrow 0$ のときだいたい原点を通る円の一部分になっているが、この特性は第2図で述べた考え方を適用するとうまく説明がつく。また、周波数が高くなると、第3節で述べたように、 I_e 特性曲線は、 $\tan^{-1}\omega C_e r_b$ だけ回転する(このトランジスタは $r_{sc} \approx 0$ である



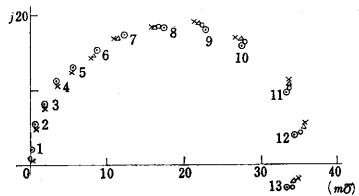
(a) 2 SA 276 h_{11} (エミッタ電流変化)



(b) h_{21} (エミッタ電流変化)



(c) 2 SA 276 h_{12} (エミッタ電流変化)



(d) h_{22} (エミッタ電流変化)

第7図

から、 -1 が回転の中心となる)ので、第2図では I_e 特性曲線が $I_e \rightarrow 0$ のとき原点を通ったが、この場合には $-j\omega C_e r_b/(1+j\omega C_e r_b)$ に向かうことになり、第7図(b)のような形になる。これは $C_e r_b$ の大きいトランジスタ

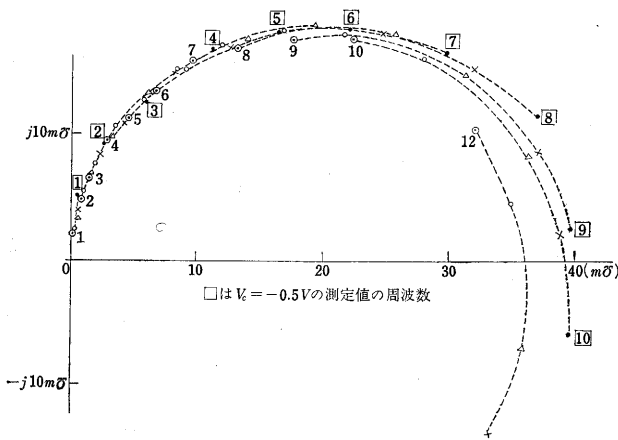
の特長である。(このトランジスタの C_c は 4.2 PF ($V_c = -6 \text{ V}$) であるが、このほぼ $1/2$ の値で上の説明がつく)。

(c) h_{22}

h_{22} はほぼ半円となっているが、第 4 象限に入っていること、エミッタ電流によって変化していることは、第 3 節までの考え方は説明ができない (なお 1.25 GC 付近で $h_{22} = (34 + j0) \text{ mV}$ となり、 $1/r_b$ より大きい値となっている。これは分布 C_c および寄生容量の影響であるがここではふれない)。

(d) h_{12}

h_{12} の測定点もだいたい半円上に並んでい



第 8 図 (d) 2SA276 h_{22} (コレクタ電圧変化)

るが、第 4 象限に入り、また約 800 Mc 以上で半円から外れていることは、やはり上述の考え方だけでは説明がつかない(5. で述べる)。

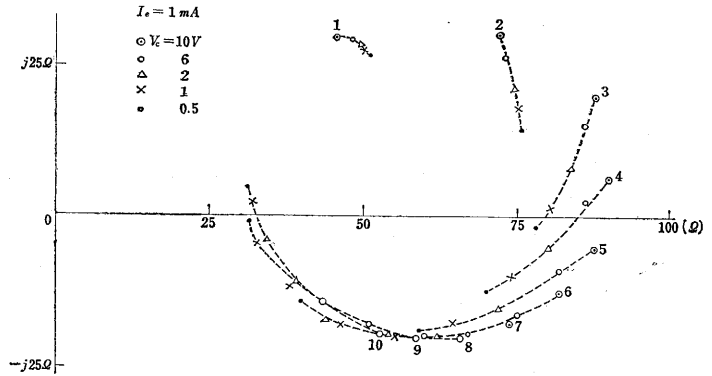
つぎに第 8 図には第 7 図と同一トランジスタのコレクタバイアス電圧特性曲線 (すなわち C_c 変化特性曲線) を図示してある (点線が V_c 特性曲線)。この図からつぎのようなことがわかる。

(a) h_{11}, h_{21}

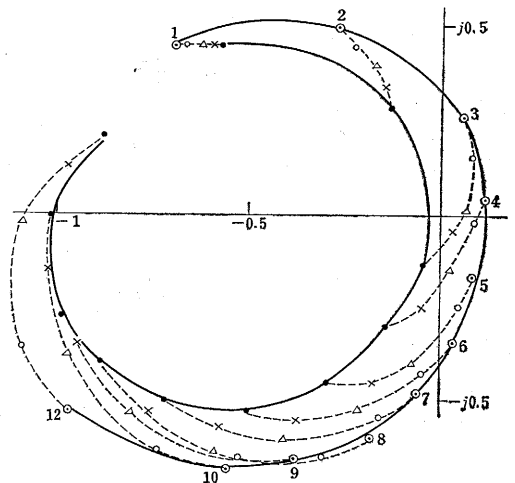
Z_e を除外して考えると、 h_{11} は h_{21} とほぼ同じような変化をしており、また h_{11}, h_{21} ともに ω が大きくなるほど V_c による変化が大きくなっているが、その理由は 3. で述べたとおりである。この例のように、 C_{or_c} の大きいトランジスタでは、 C_c を大きくすると h_{21} が原点を取り巻かなくなることもある。

(b) h_{12}, h_{22}

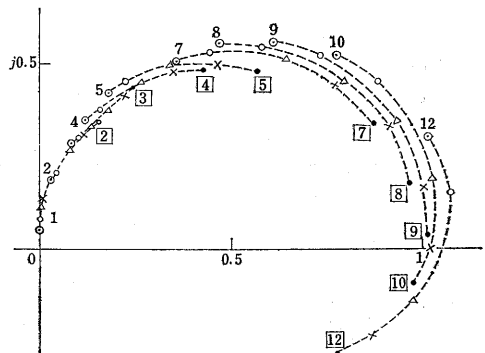
V_c 特性曲線が円弧になっているのは理論どおりである (C_c の変化比は $1:2$ であるから、数百 Mc 以下では ωC_c の積の関数となっているのがわかる) が、この円弧が互いに少しずつずれている。すなわち、 h_{12} の場合、理論曲線 ($0, 1$ 直径の円) を描くと、 $V_c = 0.5 \text{ V}$ のときの測定点がほぼこれに乗っているが、 V_c を大き



第 8 図 (a) 2SA276 h_{11} (コレクタ電圧変化)



第 8 図 (b) 2SA276 h_{21} (コレクタ電圧変化)



第 8 図 (c) 2SA276 h_{12} (コレクタ電圧変化)

く (C_c を小さく) したときは外側にている。これに対し h_{22} は、 h_{12} とは逆に C_c が小さいときの周波数特性円の方が小さくなっている。なお、 h_{12}, h_{22} ともに ω が小さくても、 C_c を大きくすると第 4 象限に入るが、これは後述の寄生素子の影響を考慮に入れると説明がつく。

さて、第 9 図には、2SA240 のベース接地 h 定数周波数特性曲線 (実線) およびエミッタバイアス電流特性

曲線(点線)を示しておいた(このトランジスタの等価回路定数, $C_e=1.6PF$ ($V_e=-6V$), $r_b=40\Omega$, $r_{s0}\approx 20\Omega$). この特性曲線を 2SA276 のそれ(第7図)と比較してみると, I_e 特性曲線は大綱においてきわめて類似していることに気がつく. また, 周波数特性も, 2SA240の方が C_{orb} が小さいことを考慮に入れると, 似ているともいえるが, 見かけ上かなり異なっている点がある. たとえば, 周波数の高い所で h_{11} のリアクタンス分(誘導性)が大きくなることや, h_{12} が第2象限に入ることなど.

なお, これらの現象や前にも述べた h_{22} , h_{12} が第4象限に入る現象および h_{12} の大きさが周波数の高い所で大きくなる現象をうまく説明するためには, 寄生素子(特にマウントのリードインダクタンスおよび漂遊容量)の影響を無視するわけにはいかない. そこで次節では, 寄生素子の及ぼす影響を, 紙面の都合もあるので, h_{12} に及ぼす影響に限定して簡単にふれておこう.

5. h_{12} に及ぼす寄生素子の影響

(1) リード・インダクタンスによる変化

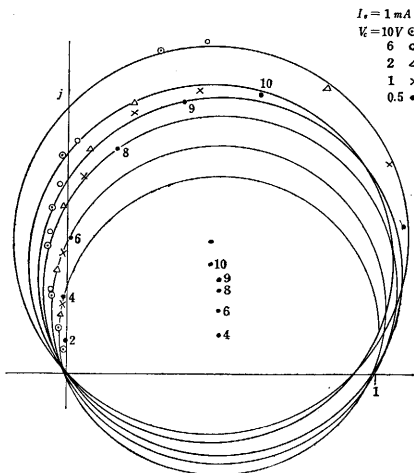
先に述べたように, h_{12} , h_{22} は第4象限に入ることが多いが, これはベースおよびコレクタのリード・インダクタンス L_2 , L_3 を付け加えて考えれば説明がつく. すなわち, このとき,

$$h_{22} = 1 / \{ r_b + (1/j\omega C_e) + j\omega(L_2 + L_3) \}$$

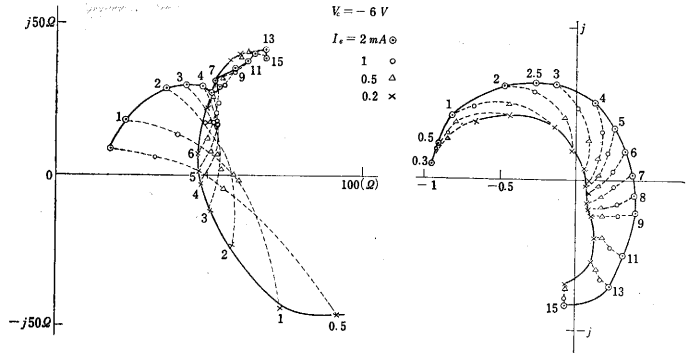
$$h_{12} = (r_b + j\omega L_2) h_{22}$$

となつて, ω を大きくするか, C_e を大きくすると第4象限に入る.

第10図は, エピタキシャルトランジスタ M8128 のコレクタ電圧を変えたときの h_{12} , h_{22} の変化の測定結果

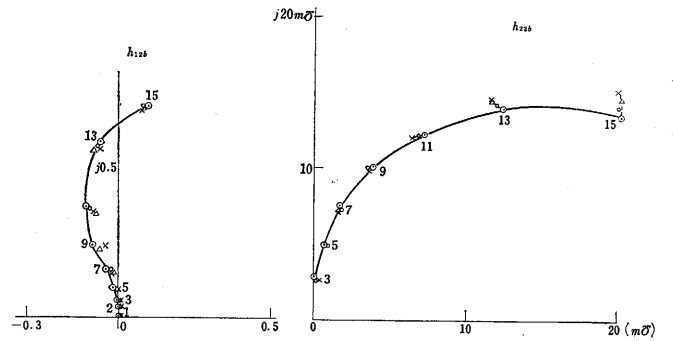


第10図 (a) M8128 (No. 5) h_{12} (コレクタ電圧変化)



(a) 2SA240 h_{11} の周波数特性 (エミッタ電流変化)

(b) h_{21} (エミッタ電流変化)

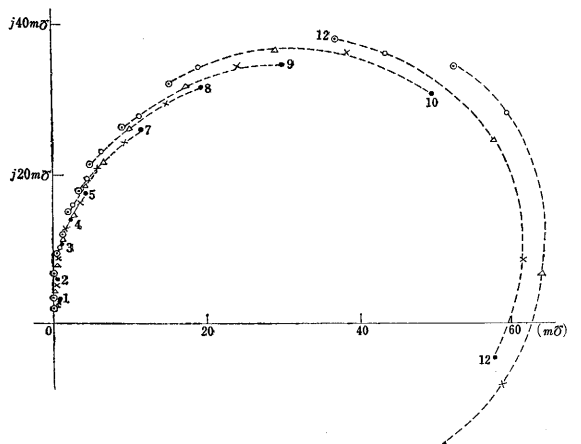


(c) h_{12} (エミッタ電流変化)

(d) h_{22} (エミッタ電流変化)

第9図

であるが, 両者の同一周波数での変化曲線はほぼ相似である. いいかえると, h_{12} は h_{22} にオームの次元をもった適当な数 (ω の関数) をかけて回転したものになっている. いま, h_{12} の変化曲線を円弧と見なしてその中心点の座標を求めると, ほぼ(0, 1)の垂直二等分線にあり, 虚数部はだいたい周波数に比例する. すなわち, $h_{12} = (r_b + j\omega L_2) h_{22}$ の関係があることを示している. この場合 h_{12} は, C_e を大きくすると第1象限に入るが, L_2 が大きく, C_e が小さければ, 図のようにかなり高い

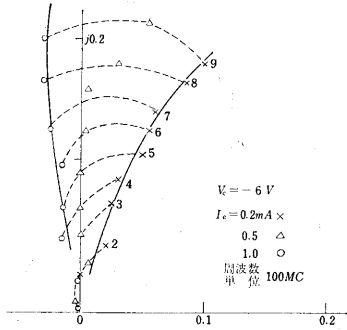


第10図 (b) M8128 (No. 5) h_{22} (コレクタ電圧変化)

周波数まで第 2 象限に入ることがわかる。この条件は、 $\omega^2 < (L_2 - C_e r_b^2) / C_e L_2 (L_2 + L_3)$ となる。

(2) 漂遊容量による変化

第 11 図に示すように、 h_{12} の周波数特性曲線が I_e の小さいときには第 1 象限にあるが、 I_e が大きくなると第 2 象限に入るトランジスタがある。この現象は、漂遊容量の影響を考慮に入れると説明することができる。



第 11 図 h_{12} のエミッタバイアス電流による変化
いま、エミッタ・ベース間、ベース・コレクタ間、コレクタ・エミッタ間漂遊容量をそれぞれ、 C_{12} 、 C_{23} 、 C_{31} とすれば、これらを考慮に入れたトランジスタの h_{12}' は次式で与えられる。

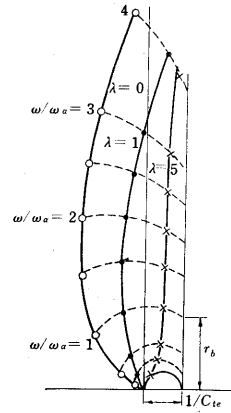
$$h_{12}' = (h_{12} + j\omega C_{31} h_{11}) / \{1 + j\omega (C_{12} + C_{31}) h_{11}\} \quad (7)$$

ただし、 h_{11} 、 h_{12} は、 C_{12} 、 C_{23} 、 C_{31} がいないときの値である。(7)式で $j\omega h_{11}$ が重要な役割をしているから、(1)式から第 3 図と同一条件でこれを求めると、第 12 図となる。これは第 3 図を 90° 回転して ω 倍したもので、 I_e 変化による曲線の長さは、 ω によってあまり変化しない(図の点線は I_e 変化の曲線で、実線は周波数特性曲線である)。したがって、 $|j\omega (C_{12} + C_{31}) h_{11}| \ll 1$ のときは、 $h_{12}' \approx h_{12} + j\omega C_{31} h_{11}$ となって、第 12 図に似た特性が観測されよう。図から I_e を小さくすると必ず第 1 象限に入ることがわかる。また、(7)式の分母の効果が大いときには、

$$h_{12}' = C_{31} / (C_{31} + C_{12}) + \{h_{12} - C_{31} / (C_{31} + C_{12})\} / \{1 + j\omega (C_{12} + C_{31}) h_{11}\}$$

となり、 h_{12} の円の外側に出ることや、 I_e の大きい方が外側にくることもわかり、先に掲げた 2SA276 のデータ(第 7 図(c))も納得できる。

以上のように、 h_{12} が第 2 象限に入る原因には、 L_2 によるものと C_{31} によるものが考えられる。通常両者が共存するが、どちらか一方が強く現われる場合がある。さきに述べた M8128 では L_2 の影響が強いが、 C_{13} による帰還も僅かながら存在することが確かめられている。



第 12 図 $j\omega C h_{11}$

2SA276 と 2SA240 は同じマウント (TO-17) に封入されているが、両者の h_{12} 曲線(第 7 図(c)および第 9 図(c))を比較してみると、2SA240 は周波数の高いところで L_2 の影響が強い。したがって、寄生素子の大きさだけでは、その影響の大小は決定しないことがわかる。一般に L の影響は r_b が小さいほど大きく、 C の影響は r_b の大きいほど大きく現われる。したがって r_b の大きさが、両者の大きさを決定する要因であると考えることができる。 $\omega \ll \omega_a$ では C の影響の方が一般に大きいことが実験的にも確かめられている。

結 言

本論文では、まずエミッタバイアス電流およびコレクタ電圧を変化すると、 h 定数がどのように変化するかという問題を、理論的に考究し、実験データと比較した。その結果、両者は大綱においてほぼ一致することを確認した。ただし、寄生素子を考慮に入れねば説明できないことも多い。そして、たとえば h_{12} に及ぼす寄生素子の影響に限っても、漂遊容量の影響の方が大きい場合と、リード・インダクタンスの影響の方が大きい場合があることを知った。これらの大小を決定するものにベース抵抗 r_b があり、したがって、トランジスタの高周波特性を論ずる場合、 r_b の大きさによって分類する必要があると思われる。また、寄生素子の影響は複雑であるが測定データから内部の特性を推定したい場合には、バイアス変化特性は非常に役に立つことがわかった。

謝 辞

ご指導いただいた安達教授、後川講師、実験に協力された市川勝男助手、細川和男・岩佐昭好両君(当時、千葉工大学生)に深く感謝する。試料を提供いただいた東芝トランジスタ工場、今岡純雄氏・岡部雄治氏にお礼申し上げる。
(1964 年 2 月 11 日受理)