

Ge 整流器の負特性発振

石 田 光 夫

INVERSE VOLTAGE GERMANIUM OSCILLATOR

By

Mitsuo ISHIDA

Synopsis : Experimental work on the inverse voltage characteristics of Ge rectifier has been studied.

As a result, the negative conductance was observed in the exponential regions of $V-I$ characteristics, and it was founded, if the circuit elements is suitably adjusted, the terminal voltages of rectifier will oscillate.

For example, a capacitance is connected to the crystal terminals, the C-R circuits will oscillate over a wide range of frequencies up to few hundred Kc.

In order to explain the oscillation mechanisms of this type, we shall now combine several characteristics.

The characteristics of chief importance are;

- (1) transient phenomena of the nonlinear C-R circuits,
- (2) hysteresis loop of $V-I$ characteristics in the inverse voltage region.

The results, which is deduced from this mechanism, have fully agreed with the experimental results.

Moreover, we pointed out the necessity of taking the "pre-break-down" phenomena in order to increase the oscillation frequency.

〔 I 〕 緒 言

radar 技術の進展に伴つて micro 波の検波, 変周, 周波数通倍の目的に Ge, Si 等を代表とする整流器が用いられている。一方これら半導体に関する整流理論は一転して増幅作用を営む transistor を産み, 通信技術に劃期的な一石を投げかけて来た。

transistor は又三極管の場合と同様に反結合発振器ともなる。然し両者の間の電導機構は前者が "injected carrier" に基くのに対し後者は熱電子である点が異なる。従つて発振又は増幅可能な動作周波数の上限は transistor では emitter と collector

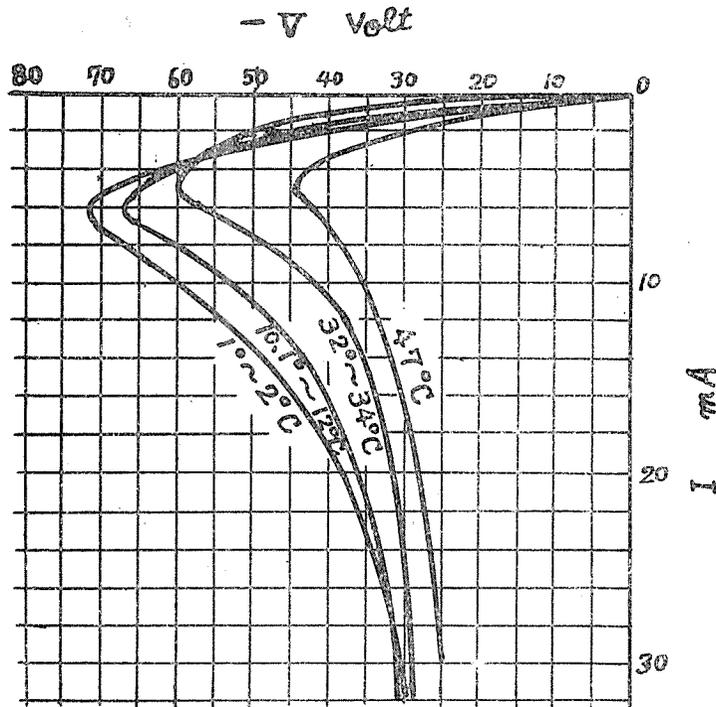
間を通る carrier の走行時間で規定される。普通実用に供されるものについての時間は 10^{-6} 乃至 10^{-7} 秒と見做されるので最高周波数は1乃至10Mc.程度と考えられる。他方実験的報告として300Mc. 台の発振に成功した事が発表されている。⁽¹⁾この事実は実用の角度からも極めて注目すべき事である。

次に整流器の(電圧—電流)逆特性の或る電圧以上の部分で負特性を呈し、回路条件を適当に選定すると容易に発振する事が観察され、発振周波数も高くとれる見込みである。

我々はこれ等の新しい技術と現象をより高い周波数帯に利用する事を目標として考察を進めているが、差当つての問題として負特性発振の特性と機構をつきとめる実験を行ったのでここに報告する。

〔Ⅱ〕 負性 conductance

一般に結晶整流器の逆特性領域に於ける電流は、(a)低電圧に於て一定な飽和電流、(b)電圧に比例する成分、及び(c)電圧のn乗の指数に比例する所謂指数函数成分よりなり立っている事が報ぜられている。⁽²⁾



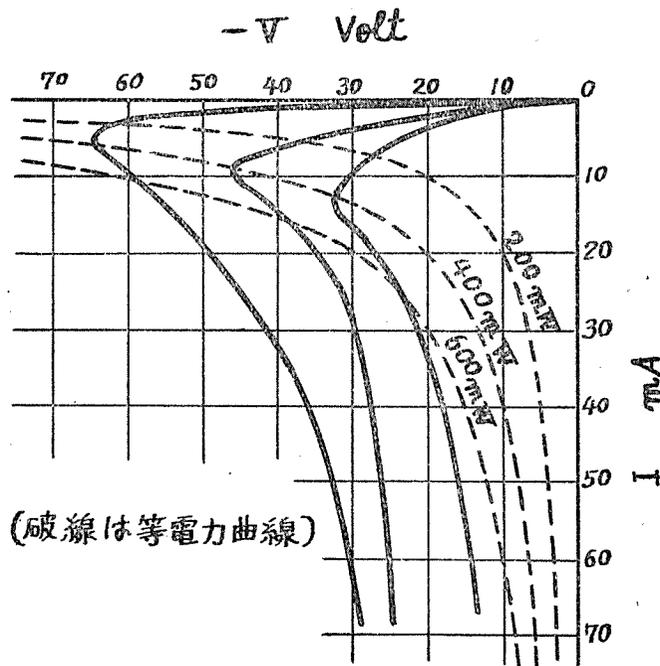
第 1 図 Ge 整流器負特性

又その機構として飽和成分は半導体より金属針への hole の移動が表面の状態とは無関係に行われる事、比例成分(又は抵抗成分)は両者の接触面に於いて局部的に barrier の高さが低下して居る事、又指数函数成分は barrier の不均一性に基くものと考えられて居る。

一方指数函数成分の領域に於て所謂負特性となり負性 conductance を呈する事が観察される。第1図は Ge についての実測例を示したもので、特性は器温に強く影響される事が窺われる。負特性は必しも特定の半導体に限定されるものでない事は従来知られて来た事であるが、そのほかに試料の純度の高い程著るしく、順特性にも僅かなが見られる事、同一材料でも場所毎或は針の圧力、表面処理の条件によつて特性が変わる事等が筆者等の実験を通じて観察される。

負特性を呈する事は前記指数函数成分電流が直流入力に相当する熱によつて急激に増加し、他方半導体の呈する負の抵抗温度係数及び器温とで決まる平衡条件によつて説明される。従つて平均直流入力を著るしく小さくする為には衝撃波を用いて測定するか、又は器温を高めた場合には負特性が消える。Benzer によつて行われた断熱測定及び第1図の特性等よりこの間の性質が分る。

更に⁽³⁾ Armstrong の簡単な model を仮想しての熱効果に関する理論は一面の事実と



第 2 図 異なる接触点の負特性

よく一致する。例えば同一試料について接触点を変えて測定した我々の結果が第2図に示す様に $I \times V = \text{一定}$ の軌跡上に乗る事の説明に適用すれば、最大逆電圧の条件が

$$I \times V = 2\pi g r_0 k T \dots\dots\dots(1)$$

但し g/T : 半導体の熱伝導度
 r_0 : 針と試料の接触半球の半径
 T : 器温 (絶対温度)
 k : Boltzmann 氏定数

で与えられ、同一試料では g, r_0, T が一定と見做される事より $I \times V = \text{一定}$ となる事が証明される。

即ち之等の実験結果及び諸説を総合すれば、点接触結晶整流器の負特性は熱効果が主因をなし、指数函数成分領域に生ずるものと結論される。

次に熱効果を取り除いた場合の逆特性領域の電流値は

$$I = I_s \exp bV^{\frac{1}{2}}/kT \quad (\text{但し } V > 10 \text{ volt}) \dots\dots\dots(2)$$

$$I_s = a \exp (-bc/kT)$$

a, b, c は定数

で与えられる。 I_s 及び b/kT は (2) 式の対数を取れば

$$\log_e I = \log_e I_s + \frac{b}{kT} V^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3)$$

となり、 $(\log_e I - V^{\frac{1}{2}})$ 曲線は直線型で $V = 0$ に相当する I より I_s 、又直線の傾斜より b/kT が求められる。

本報告の実験に使用した Ge について実測結果より求めた値を例示すれば $T=274 \sim 275^\circ\text{k}$ に於て $I_s = 130 \mu\text{A}$ 、 $b/kT = 0.44$ である。これらの定数を用いて計算した断熱特性を後に引用する。

負特性は結晶整流器の本質的な現象ではなく熱的動作条件の如何によつて静的直流特性と断熱等温特性との中間の性質をとるものである事が結論される。

〔Ⅲ〕 等 価 回 路

点接触整流器の (電圧—電流) 特性を論ずる場合に便宜上電氣的に等価な回路に置換して取扱われる。第3図にその回路図を示す。 R_s は所謂 spreading resistance と称されるもので半導体の比抵抗を ζ と置けば

$$R_s = \zeta/2\pi r_0 \quad (\text{半球状接触の場合}) \quad (4-a)$$

$$R_s = \zeta/4r_0 \quad (\text{半径 } r_0 \text{ の円板状接触の場合}) \quad (4-b)$$

で与えられる。この値は逆電圧の高い場合又接触の不斉一、試料の純度、周波数効果等によつて変化する事が報ぜられ計算値より少いのが普通である。

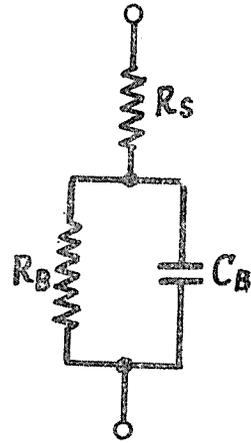
本報告の実験に使用した Ge 整流器では $\zeta = 0.01\Omega\text{cm}$ 又 $r_0 = 10^{-3}\text{cm}$ 程度であるから (4-a), (4-b) 式に代入して夫々 1.6Ω , 2.5Ω と得られる。(一般に使用される純度の高いものでは数十 Ω)

次に R_B , C_B は夫々 barrier layer の呈する抵抗及び容量を示し、前者は (電圧-電流) 特性より定義されるもので試料の種類、純度は勿論、器温、動作電圧等の函数である。後者は

$$C_B = \epsilon A / 4\pi d \dots\dots\dots(5)$$

但し A : 接触面積, ϵ : 誘電定数, d : barrier層の厚さ
 で与えられ、試料の純度、処理条件、動作電圧等の函数である。従来迄報告された結果を総合すると大略 0.2 乃至 $0.5\mu\text{. f}$ 程度の大きさである。

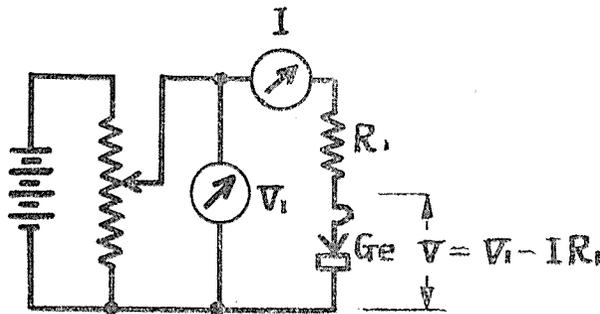
又 R_B は普通 10^2 乃至 $10^3\Omega$ 以上で $R_s \ll R_B$ と見做されるから第3図の等価回路は実際には近似的に R_B と C_B 丈を考えれば良い事になる。



第3図 等価回路

〔Ⅳ〕 負特性発振

第4図に示す様な (電圧-電流) 静特性測定回路に於て電源電圧 V_i 及び直列抵抗 R_i



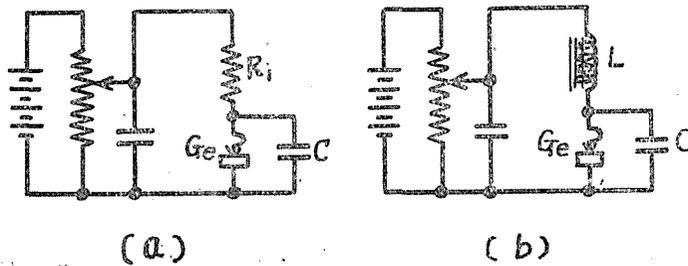
第4図 逆特性測定回路

の値を適当に調整するとき負特性のある領域の部分に於て発振する現象が認められる。Benzer 等の論文に於ても言及してあるが何れも極めて簡単な記載に止まつて居る丈である。我々は第5図 (a) に示す様に整流器と並列に静電容量を附加する事によつて常に連続した、安定な発振の得られる事、又直列抵抗 R_i の代りに同図 (b) に示す様に

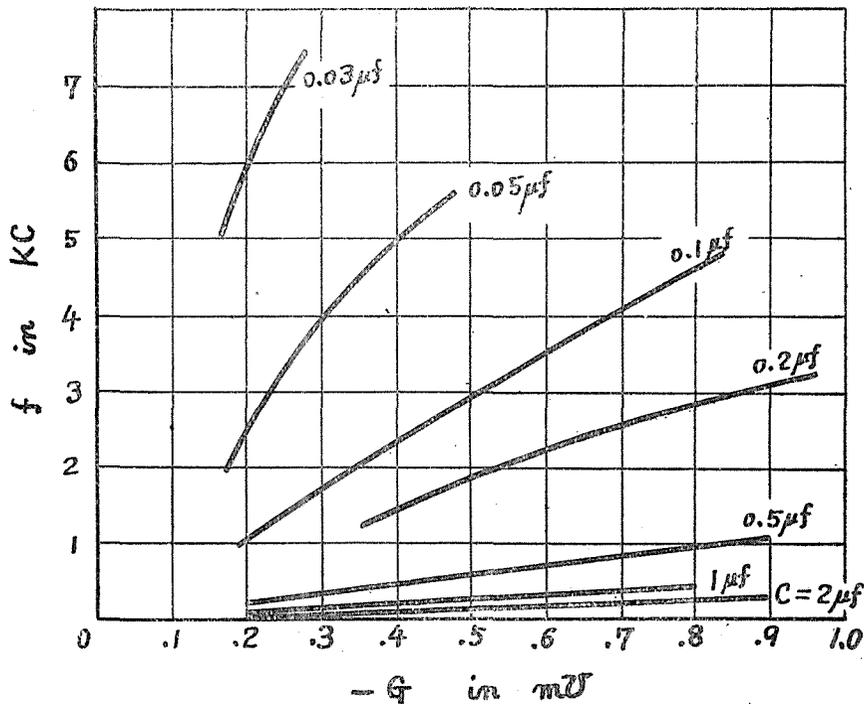
inductance L で置換しても常に発振条件を満たす事を知った。

発振周波数は回路定数、電圧及び器温の函数である。第6図は第5図(b)の回路について容量 C を補助変数として、静特性より割出した微分 conductance に対する周波数の関係の実測例で、実線の両端の部分は発振停止領域である。

之等の実験を通じての結論として発振周波数は $C \times R_1$ の少い程、 $-G$ の値の大きい程高く、発振周波数の下限は最大逆電圧、上限は最大電流値によつて制限される事等が数えられる。



第5図 負特性発振回路

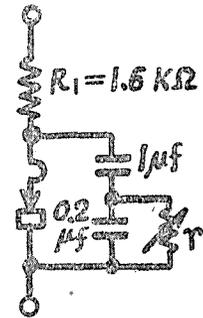


第6図 発振周波数特性

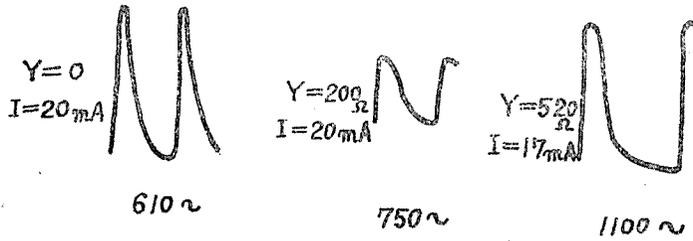
現在238Kc 迄発振さす事が出来たが極限はもつと高められる見込みである。出力波形は第7図に示す回路について行つた第8図の結果に例示する様な指数函数曲線よりなる充放電型波形である。又その出力尖頭電圧は回路定数及び発振周波数に対して第9図に示す関係をとる。

発振領域は負特性、換言すれば最大逆電圧に相当する電流値に始まりそれ以上の電流の流れる全域（発熱量によつて破壊せぬ範囲）に連続して分布して居る。

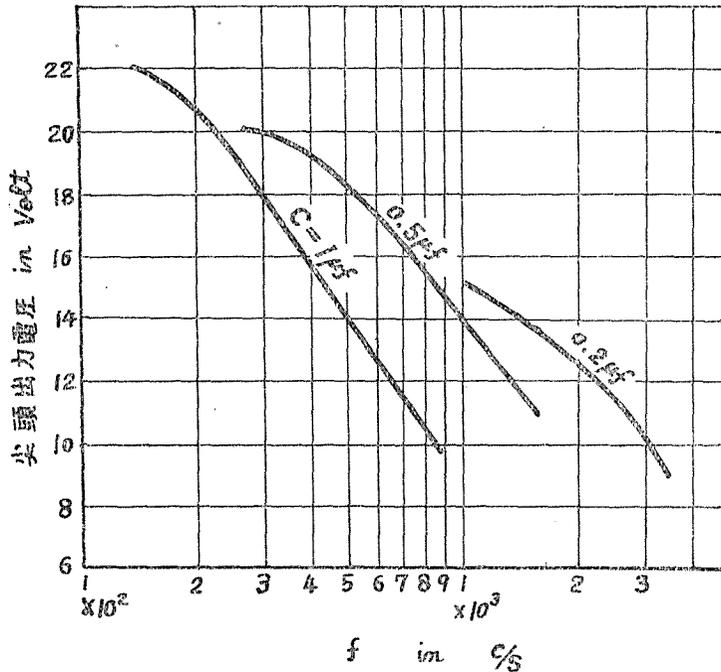
尙逆特性のほかに順特性の或る電流区間に狭いながら負特性



第7図 可変周波回路



第8図 出力波形



第9図 発振出力電圧特性

を呈し発振現象を伴う事が観察され定性的には逆特性領域で観測された上記諸特性と一致する結果が実測される。然し安定度は逆特性の場合に較べて劣り実用性に乏しい。この現象は順方向の負特性と云うよりは P 型の逆特性と見做した方がより妥当な様にも判断される。

従つて負特性発振に関する諸特性は N 型, P 型の如何に不拘逆特性領域に附随する現象と考えて大過ないものと思われる。

〔V〕 負特性発振機構

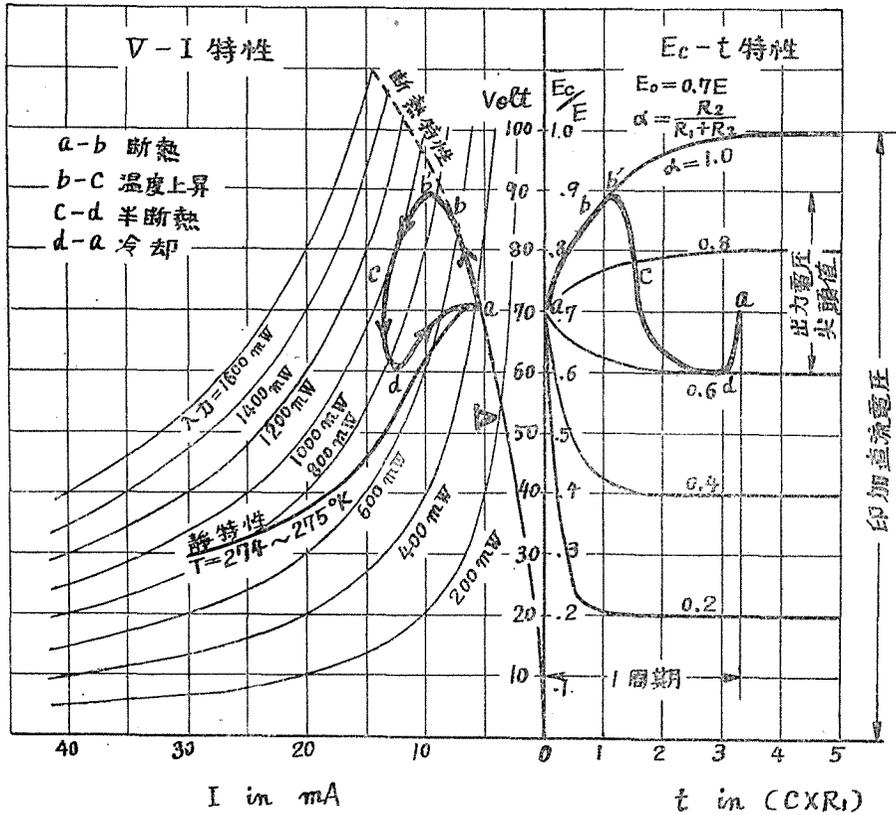
静電容量と抵抗素子よりなる回路系が饋還増幅機構を介さずに自励振動系となる代表例は放電管発振器である。この場合の動作機構は gas の種類によつて決まる点弧と消弧の両電圧の間で充放電の過渡特性が繰返される事にある。即ち C と並列に接続された抵抗量 R_2 が時間的に非連続的变化をとる事が発振を持続さす為に必要な条件である。

点接触結晶整流器の場合の負特性発振は回路的には放電管の代りに整流器が接続された丈である。然し抵抗量の変化の様子は本質的に異なる。即ち〔II〕に述べた様に電圧—電流特性が入力量に応じて断熱特性と静特性の中間特性曲線を辿り、然も時間的に温度の出入に応じて履歴特性を呈する点が著しい相違である。

第10図の左半分の曲線は第1図の実測静特性を基とし〔II〕に述べた結果を適用して計算した断熱特性と等電力線群(細線, 数字は入力量を表す)である。電圧印加後の(電圧—電流)特性の時間的变化の様子は C の端子電圧の過渡特性に応じて太線の様な軌跡を辿る。即ち充電特性の初期には dv/dt が大きい為準断熱的に現象が進む(ab), 次で飽和特性に近づくにつれて入力量が増し, 温度上昇に伴つて R_2 が急速に低下する(bc), それに応じて端子電圧が降下し, C に充電された電荷を放出して準断熱的に電流が減少(cd), ついで器温と電力による発熱量との熱的平衡点 d に達すると次第に器温に復元し($d-a$), 1 cycle を完了する。

軌跡の原点が v_{max} を通る事は oa 間の電流特性が飽和成分と抵抗成分とよりなり発熱量が少い為断熱特性と静特性の間の開きが少く, 一方に於て回路の時定数が両者の開きを区別する程小くない事がその原因である。

次の C の端子電圧の時間的变化は一般に漏洩抵抗 R_2 直列抵抗 R_1 よりなる充放電曲線で表される。之を数式で取扱う事は, R_2 が電圧に対して $abcd$ の様に非直線的に変化するほかにこれと関連して時間的に時定数の変る事を考慮に入れなければならないから, 相当困難である。定性的な結果を期待する目的には図式解法による方が都合良い。第10図右半分の図形はこの目的に作図したもので曲線群は充放電曲線で次式に従つて計算したものである。



第 10 図 負特性発振機構の解析図

$$E_c = E \cdot \alpha \left(1 - e^{-\frac{t}{caR_1}} \right) + E_0 e^{-\frac{t}{caR_1}} \dots (6)$$

但し

E : 印加電圧

E_c : C の端子電圧

E_0 : $t = 0$ に於ける C の端子電圧

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

(電圧—電流) 軌跡と対応して E_c の時間に対する変化を作図したものが太線に示した 1 週期の軌跡, 即ち出力波形である。又 $(ob' - od)$ は出力電圧の尖頭値となる。

以上の解析を通じて [IV] に記した観測結果を照合すると, 波形, 出力電圧, 動作特性範囲, 回路条件等が極めて良く符合する事が分る。

即ち結晶整流器の負特性発振の機構は C の充電特性に従つて (電圧—電流) 特性が断熱と静的な特性の範囲内で履歴現象を呈する事に起因するものと結論される。

従つて周波数をより一層高める為の方策として推論される事は回路の時定数を小さく選

ぶ事のほかに $abcd$ の loop を画く時間を短縮する事で、具体的には ab , cd 特性の間の温度差を小さくする為に、(a) 器温を高めるか、平均電流を多く流す事、(b) oa 特性部を積極的に利用する事、などが考えられる。

(a) は既に [IV] の実験結果よりも判断される事である。(b) に対しては熱効果以外に考察すべき事が残されている。例えば一般放電の場合に問題となる、Townsend の α 効果、 β 効果による "pre-breakdown" 現象を機構の中に取り入れなければならない。この事は物性論的に小野氏 (名大) の実験、西沢氏 (東北大) 私信の中でも問題にされている事である。

従つて負特性発振は必しも負性 conductance とは直接関係ないものである事を明かにしなければならぬ。又以上の取扱いでは C に較べて値が小さいので C_B の影響を無視して考えて来たが一層高い周波数ではこの事も考慮に入れなければならぬ事は当然である。

[VI] 結 論

主として G_0 整流器の逆特性領域に於ける負特性発振現象について考察して来たが、整流器と並列に容量を挿入すると極めて安定に然も広範囲に発振さす事が出来る。これらの結果を総合し更に回路の充電特性と整流器の (電圧—電流) の静特性と断熱特性の相関関係を加味して発振機構を説明した。

即ち (電圧—電流) 特性の熱的履歴現象が機構の本質的な原因で、静的負性 conductance は必しも関係ない事が結論される。

尙抵抗成分電流領域では熱効果以外に "pre-breakdown" 現象が問題となり一層高い周波数を発振さす場合に特に注意しなければならぬ事にもふれた。

試料の御恵与と有益な御助言を賜つた東北大渡辺寧教授、西沢潤一氏、及び共同研究者の同大茨木康行氏及び実験に従事された信大工学部通信科学生戸谷茂男、坂口正人両君等の諸氏に対し深い敬意と謝意を表す。

引用文献

- (1) Electronics, PP. 116; Nov., 1952
- (2) S. Benzer, Jour. Appl. phys., vol. 20, pp. 804; Aug., 1949
- (3) H. L. Armstrong, Jour. Appl. Phys., vol. 24, PP. 1332; Oct., 1953