

# 鑛石檢波器の特性について (I)

## 硅素檢波器

阿部英太郎

On the Characteristics of Crystal Detectors. I.

Silicon Rectifiers.

By Hidetaro Abe.

**ABSTRACT :** The current through the contact points of many silicon detectors was measured exactly for applied voltage of 5 mV to 1 volt. The expression for the "differential resistance" was given in a little more complicated form than that of the theory of Mott, Bethe, Wilson and others. The expression can be explained by the hypothesis that one point-contact has two rectifying mechanisms whose rectifying directions are opposite to each other and both are according to Bethe's form. The rectifying characteristics for the 50 cycles, and high frequencies (up to 20 Mc) were also observed which practically agreed with the static characteristics. Some quantitative results for the microwave region were found.

(1949年8月2日受理)

### 1. 緒言

ある種の半導體(金屬硅素, 黄鐵鑛, 方鉛鑛等)の鑛石に細い針金を接觸させたものを鑛石檢波器と言ひ, 高周波の電波を検出するために用いられる。鑛石式ラヂオに用いられるのもこの一種である。しかし近年物理學に於て急激に注目されてきた波長數厘の電波所謂マイクロ波(microwave)の領域に於ける唯一の檢波器は鑛石檢波器なのである。マイクロ波が實用的にはレーダーや多重通信等に用いられるので, 戦時中主としてアメリカでマイクロ波用の部品として多角的な研究が行われた結果, 鑛石檢波器に關する研究は一新された觀がある。さらに物理學の基礎的研究分野となつたマイクロ波分光學(microwave spectroscopy)に於て, 發振器と共に重要な部品であり, かつそれ自身としても半導體物性論の重要な研究課題である。またこれら多くの研究の結果として, 半導體ゲルマニウムを用いた増幅器であるトランジスター(transistor)が出現したが, これを解明するためにも鑛石檢波器自身の研究はますます必要であると思われる。

所で鑛石檢波器は高周波の電波を検波する装置でありながら, 現在までの理論はすべて各瞬間に平衡が成

り立つてゐるとする靜的な取り扱いであり, 従つて嚴密には靜特性及び振動數の低い交流にしか適用出來ない。以下その理論の代表的なものを簡単に考察してみよう。

一般に半導體と金屬とを接觸させると, 半導體の表面附近の電荷分布が變化して, その部分に電氣抵抗の高いポテンシャル障壁(potential barrier)が形成される。以下半導體内の電流の擔い手(carrier)が電子である場合について述べると<sup>(1)</sup>, 勢力の十分大きな電子はこの障壁を通りこしてゆくと考えられる。外部の電場が加えられていない時には, 金屬から半導體の方へ障壁を通りこしてゆく電子の數と, 逆に半導體から金屬の方へ通りこす數とは等しい。電場が加えられた際には, 通りこしてゆく電子の數に差が生じ, 従つて整流作用があらわれる。このポテンシャル障壁を越えるときに, 電子は位置空間的には格子點に分布している半導體原子の間をくよりぬけてゆくわけであるが, 格子點原子と衝突しながら擴散してゆくと考える diffusion theory と, 障壁の部分を一ぺんに通過してしまふとする diode theory とがある。前者は障壁内における carrier の平均自由行程が障壁の厚さに比べて十分小さいとの假定であり, 後者は十分大きいとの

假定である。

diffusion theory には, Mott<sup>(2)</sup>, Schottky<sup>(3)</sup> 等のものがあり, 結論は障壁をはさんで  $V$  なる電位差が加えられたとき流れる電流  $j$  は

$$j = j_0(V_0 - V)[1 - \exp(eV/kT)] \quad (1)$$

ここに  $j_0$  は  $evn_0/d$  なる  $V$  によらない常数である, 但し  $e$  は電子の電荷,  $v$  は半導体内の carrier の易動度  $n_0$  は接觸面における carrier の密度,  $d$  は障壁の厚さである。また  $V_0$  は volt ではかつた障壁の高さである。

diode theory は Bethe の理論であり,

$$j = j_0 \exp(-e\phi/kT) [\exp(eV/kT) - 1] \quad (2)$$

但し  $A$  は針と鑽石との接觸面積,  $\phi$  は volt ではかつた障壁の高さである。また  $j_0$  は

$$j_0 = \frac{1}{2} enA(2kT/\pi m)^{1/2}$$

なる  $V$  によらない常数である。

また障壁が充分薄く電子が量子力學的なトンネル効果によつて通過しうると考えられるとき, Wilson 等<sup>(5)</sup> の理論が成立する。これは

$$j = j_0 [\exp(eV/kT) - 1] \exp(-\alpha V) \quad (3)$$

なる結果を與える。但し  $\alpha$  は障壁の形によつてきまる常数である, 整流電流の方向が通常の檢波器で實測されるものと逆になつてしまうことがこの理論の最大の欠陥である。

これらの理論は結論として  $j$  の表現の中にすべて  $[\exp(eV/kT) - 1]$  なる乗数を含んでいる。然るにこの指數における  $V$  の係数は, 理論値は  $e/kT$  となり室温で  $40 \text{ volt}^{-1}$  であるが, 實測は  $20 \text{ volt}^{-1}$  かその數分の一程度にすぎない。この事實を説明するために Bethe<sup>(6)</sup> は多重接觸の考えを用いた。即ち一つの接觸も實は多くの小さい接觸から出來ていて, 各點においてその飽和電流に達する電壓の値が異つており, 各點の整流特性を重ね合せたものとして説明しようとしているが, やゝ技巧的な感をまぬかれない。この點については更に温度特性等の裏づけが必要であらう。しかし乍ら少くとも半導體内部における電流の carrier を一種類として, 熱力學的平衡が成り立つていゝとすれば, 少し位モデルを変えてみてもこの係数は  $e/kT$  になつてしまい, この點も理論に於ける問題であらう。

また鑽石檢波器の靜特性を  $V$  の小さい範圍で展開して<sup>(7)(8)</sup>

$$I = aV + bV^2 + cV^3 + \dots \quad (4)$$

とする。Meyerhof<sup>(9)</sup> が Bethe の理論式 (2) を前提

とし, この展開式の係數  $a$  が  $\exp(-e\phi/kT)$  に比例するものとして, この温度變化から  $\phi$  即ちその金屬と半導體の接觸部分との間の接觸電位差(contact potential difference)を求めている。そしてこれが兩者の仕事函數の差(work function difference)と無關係なる事を示している。そしてこれを説明するために Bardeen<sup>(10)</sup> は表面準位(surface level)を持ち出して理論を立てた。しかしこの問題に表面準位が事實重要な役割を演じていたにしても, Meyerhof の測定が Bethe の理論式が正しいものとして接觸電位差と考えられるものを導き出している點に吟味の餘地があるように思われる。後に示すように出發點とする理論のとり方をかえれば Meyerhof の測定したものは接觸電位差でも何でもないので, それが仕事函數の差に無關係であつても何等意とするに足りない事がないのである。

また或種の鑽石(半導體)しかマイクロウェーブを檢波しない,(またはその波長領域になると感度が低下する)という事實は今までの理論では解決のつかない點である。針と鑽石との接觸に容量があるので, このやうな高周波に對しては接觸が容量的に短絡されてしまふのだという説明もあるが, 後に述べるやうに方鉛礦では數 Mc に於て感度が急激に減少するので, 簡単に容量が原因とは考えにくい。carrier が障壁を通過するに要する時間(transit time)に起因するものもあるのではないかと考えられる。

結局鑽石檢波器の整流機構はなかなか複雑であり, 多くの問題を含んでいる。理論の方々の本格的取り扱いによる解明を望むと共に, そのためにはどのやうな實驗をしたらよいか御教示をお願いする次第である。

## 2. 實驗に用いた硅素

使用した半導體は本報告のものは全部硅素である。chemical pure 程度であるのでかなり不純物の多いものと思われる。(さらに controled impurity と思われる鑽石も數箇用いた。) 鑽石を適當な大きさに割り, そのまゝまたは裏面にニッケルメッキを行つてハンダの中にうめこむ。しかしニッケルメッキを行つても實用上何等向上したとは思われぬ, それよりもハンダへのうめこみ方の技巧が悪いと接着に問題を生ずる様である。割れた面そのまゝを, またはグラインダー, (べにがら), 金剛砂, 數種のこまかいサンドペーパー等でこの順序に磨き上げたものを用いた。それに先端をとがらせ 1~2 回程度まいてスプリングアクションをもたせたタングステンまたはニッケルの針をお

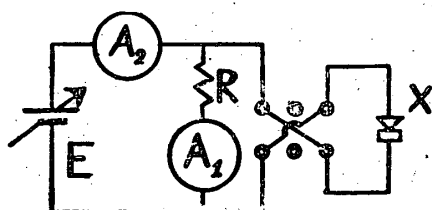
く。タングステンの場合には先端の丸みは顕微鏡でみて直径 1/100 mm の程度である。支持具に組み上げてから長時間放置し特性が安定してから測定する。以下に数値を例示する鑽石検波器はかなり大きな電流 (数 mA. 程度) を流して1時間近くの測定を行つても、その前後の静特性の電流値の變化は 0.3~0.8 % 程度のものである。

### 3. 静特性

1. 装置 鑽石検波器の静特性即ち直流の特性を精密に測定するには、第1圖のやうな回路を用いる。A<sub>1</sub> 及び A<sub>2</sub> は精密型の microammeter である。鑽石検波器 X への印加電圧 V とそのとき流れる電流 I は、A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> のよみ I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> によつて次のやうに與えられる。

$$\begin{cases} V = RI_1 \\ I = I_2 - I_1 \end{cases} \quad (5)$$

このやうにすれば電圧計と流れる電流を補正することが出来る。V の小さい範囲ではこの補正を行わない



第1圖 鑽石検波器の静特性測定回路

と相當大きな誤差の原因になる。

2. 結果 a) 印加電圧が小さい時 印加電圧の小さい場合即ち V-I 特性の原点附近の特性は、実用上その検波器が微小入力電波の検出 (low level detection) に用いられるときの性能をあらわすものとして重要である。以下鑽石検波器の特性を原点附近で (4) 式のやうに展開したとき、その第3項以下を無視する範囲を取り扱う。この範囲内の任意の一定電圧 V をとり、これを鑽石に正方向、逆方向に印加する、ここに正逆と稱するのは、夫々、より大きな電流が流れる方向即ち順電流又は正電流 (easy flow) I<sub>e</sub> の方向、及びその逆即ち、逆電流 (hard flow) の方向である。順逆電流を夫々絶対値で I<sub>e</sub>, I<sub>h</sub> とすれば、係数 a, b は

$$\begin{cases} a = (I_e + I_h) / (2V) \\ b = (I_e - I_h) / (2V^2) \end{cases} \quad (6)$$

であらわされる。したがつて理論的に興味のある b/a は

$$b/a = [(I_e - I_h) / (I_e + I_h)] \cdot (1/V) \quad (7)$$

で與えられる。

ここで理論式を展開すれば、Mott の式 (1) からは、

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{2} \frac{e}{kT} - \frac{1}{V_0} \quad (8)$$

Bethe の式 (2) からは、

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{2} \frac{e}{kT} \quad (9)$$

Wilson の式 (3) からは、

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{2} \frac{e}{kT} - \alpha \quad (10)$$

が與えられる。室温では (9) 式よりは b/a として 20 volt<sup>-1</sup> が與えられる。(8) 式でも V<sub>0</sub> が 0.5 volt の程度以上、即ち障壁の高さが 0.5 electron volt の程度以上あれば、b/a は大體この程度になる。しかるに種々の資料に對する實測値は通常これより大分小さい。2, 3 の例を第1表に示す。(7) 式を用いて實測するとき使用する電圧 V は通常 10 mV の程度であり、また原点附近で圖上微分を行う方法<sup>(8)</sup>でも印加電圧は同じ程度であるから、前述の飽和電流に達する電圧のちがいを問題にしている Bethe の多重接觸の理論では、この事實をすぐには説明出来ない。

第1表 特性曲線の原点附近より求めた b/a の値  
単位は volt<sup>-1</sup> である。

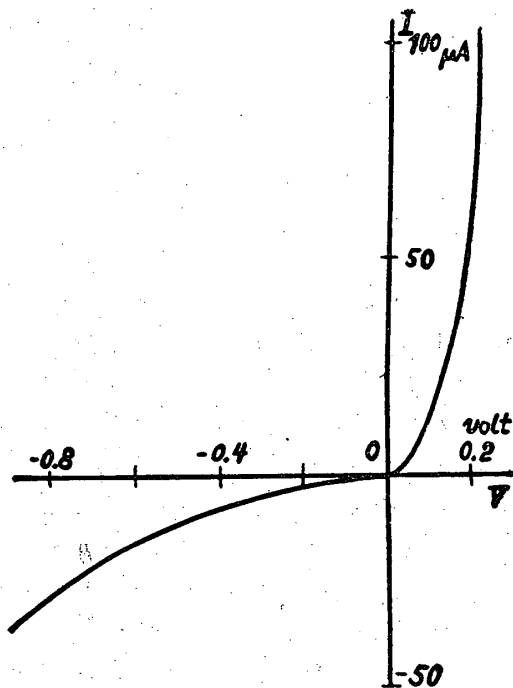
	V	ST 48	2 S 3	2 S 4	N 21
(7) 式より	10 mV	—	—	3.03	9.25
	20 mV	—	2.38	2.92	9.73
	30 mV	6.67	2.27	3.40	7.07
	40 mV	8.52	2.18	3.40	7.70
	50 mV	7.96	2.47	2.76	7.48
圖上微分より		7.75	2.24	3.07	8.50

b) 印加電圧がやや大きいとき 印加電圧を 1 volt 程度まで擴大して静特性を精密に測定した。一例を第2圖に示す。この圖から微分抵抗 R<sub>(v)</sub> = dV/dI を求めると第3圖の如くなる。静特性が一見甚しく異つていふやうに見えても (外國で實用にされているものも) 微分抵抗の曲線の形は似たりよつたりで、大體對數曲線の重ね合わせで表現出来る。即ち順電壓 (順電流を流す向きに電圧を印加したとき) における R<sub>(v)</sub> から extrapolate して一定に残る部分 R<sub>s</sub> を決定する。これは spreading resistance に相當するものと考えられる。従つて眞に障壁にかかつている電圧を V' とすれば V' = V - IR<sub>s</sub> である<sup>(11)</sup>。

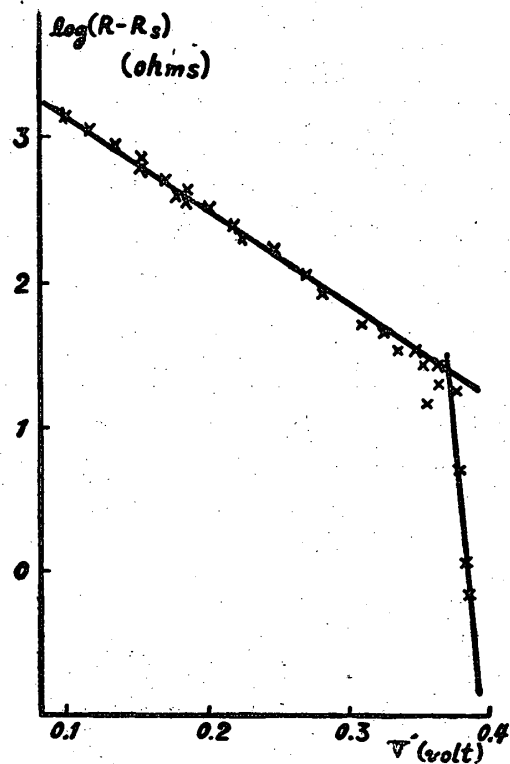
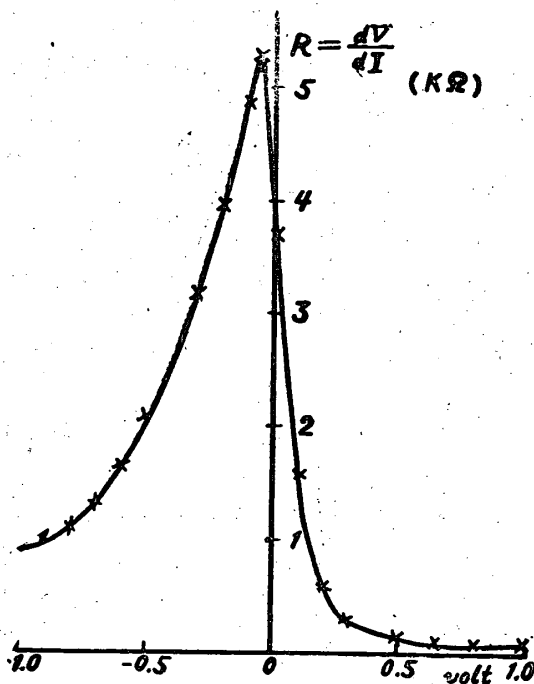
順電壓の R<sub>(v)</sub> = R<sub>(v)</sub> - R<sub>s</sub> と V' との間の關係は第4圖に示す如く

$$(R_{(v)} - R_s) = R_1 e^{-eV'} \quad (11)$$

となる。また逆電壓の V が約 -0.1 volt 以上の範囲においては (R - R<sub>s</sub>) と V との間には (この範囲では



第2圖 鑽石検波器の静特性の一例

第4圖 順電圧に於て眞に障壁に加わつてゐると考えられる電圧  $V'$  とその電圧における微分抵抗  $R$  との関係第3圖 第2圖に示した鑽石検波器の微分抵抗  $IR_s$  は小さいので  $V' \approx V$  とみなして(第5圖に示すような関係があるので

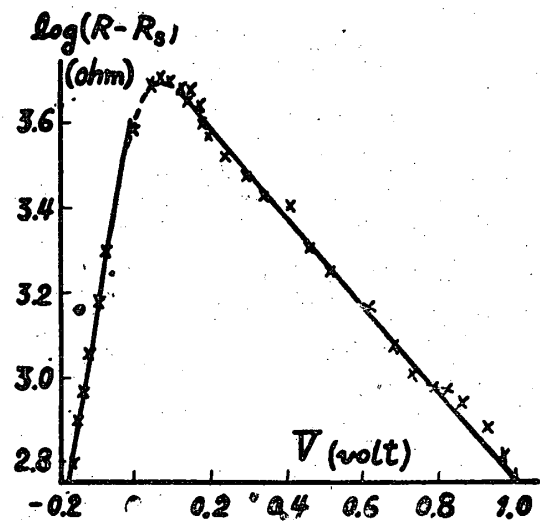
$$(R(V) - R_s) = R_2 e^{qV'} \quad (12)$$

$$V' < 0$$

とおく事が出来る。

結局電圧  $V'$  の全領域では

$$R(V) = dV'/dI = 1/\{1/(R_1 e^{-qV'}) + 1/(R_2 e^{qV'})\} \quad (13)$$



第5圖 逆電圧における印加電圧とその電圧における微分抵抗との関係。但し横軸は逆電圧を正にとつてある。

なる近似が成立する。さらに  $R(V)$  は

$$R(V) = dV/dI = R_1(V) + R_s \quad (14)$$

である。(13) 式より

$$dI/dV' = 1/R(V) = (1/R_1) e^{qV'} + (1/R_2) e^{-qV'} \quad (15)$$

これを積分して

$$I = I_1 (e^{qV'} - 1) - I_2 (e^{-qV'} - 1) \quad (16)$$

但し,  $I_1=1/R_1p$ ,  $I_2=1/R_2q$  であり,  $V'=0$  のとき  $I=0$  になるように積分定数を選んでいる。

この式の形をみると理論で得られる代表的な式 (2) の  $V'$  の係数をかえて,  $e/kT$  より小さな  $\beta$  にした式

$$I=I_0(e^{\beta V'}-1) \quad (17)$$

なる特性を示す整流器を逆向きに並列に結合したものと等価であると考えられる。この事及び第二報の周波数特性からみても、鑽石検波器の一つの接点に於ては (外國で實用になつてゐるものについても)、二つの各々逆方向に整流する機構が存在しその重ねあわせになつてゐると考えると都合がよい。

この點 Wilson の結果は少し有利のようにも考えられるが、數量的には満足な結果を與えない。その點を簡単に示すと、彼の導いた理論式 (3) にやや任意性を與え,  $e/kT$  を任意の正數  $\beta$  におきかえて

$$j=j_0[e^{\beta V}-1]e^{-\alpha V} \quad (18)$$

とする。

$$R(V)=dV/dj=1/(dj/dV) \\ =e^{\alpha V}/[j_0\{(\beta-\alpha)e^{\beta V}+\alpha\}]$$

$V$  の大きい所を考へて、

$$R=e^{-(\beta-\alpha)V}/[j_0(\beta-\alpha)] \quad (V>0) \quad (19)$$

$$R=e^{\alpha V}/(j_0\alpha), \quad (V<0) \quad (20)$$

としてよい。ここで  $\alpha>\beta$  ならば,  $V>0$  で微分抵抗が負になつてしまひ實測とあわない。  $\beta>\alpha$  ならば, これら (19), (20) 式は實驗式 (11), (12) 式と同じ形になる。係數及び指數を比較してみると

$$\begin{cases} p=\beta-\alpha, & R_1=1/[j_0(\beta-\alpha)] \\ q=\alpha, & R_2=1/(j_0\alpha) \end{cases}$$

なる關係がある。これらの關係から

$$R_1/R_2=\alpha/(\beta-\alpha)=q/p$$

となり、従つて

$$1/(R_1p)=1/(R_2q)$$

なる關係が成立しなければならない事になる。しかるに實測値は第2表に示す如く、この關係は明らかに満たされていない。

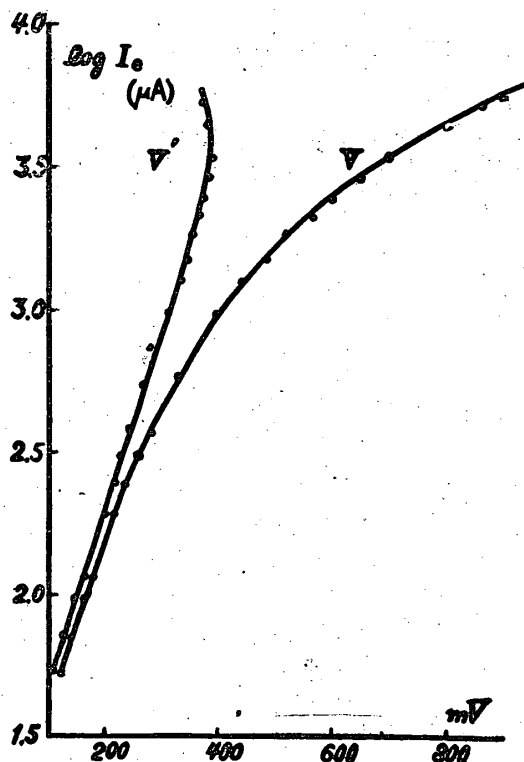
また微分抵抗の式 (11) から順電流  $I_0$  と  $V'$  との間には

$$I_0=I_1e^{pV'}, \quad \text{但し } I_1=1/(R_1p) \quad (21)$$

なる關係が成立するはずである。勿論中にはこの關係が  $V'$  のかなり大きな所まで成立するものもあるが、多くの例では上のように求めた  $R_0$  を用いると第6圖のやうに  $V'$  の大きい所で曲線になつてしまひ、その多くは  $I_0$  が増大すると  $V'$  が減少するという負抵抗を示す。始めこれは  $R_0$  のとり方がそれほど精確でないためであらうと考えて、 $R_0$  を parameter として

第2表 鑽石検波器の靜特性を (13), (14) 式の如く解析した實測値の例。但し微分の取り方によつて數%の誤差はまぬかれない。

	鑽石番號			
	ST 48	2S3	2S4	N 21
$R_1$ (k $\Omega$ )	12.68	6.04	4.49	1.68
$p$ (volt <sup>-1</sup> )	16.42	14.71	12.14	19.07
$R_2$ (k $\Omega$ )	62.6	6.07	5.92	2.83
$q$ (volt <sup>-1</sup> )	0.199	2.254	0.525	1.92
$R_0$ (ohms)	212	97	490	21
$\frac{1}{R_1p} (=I_1)$ ( $\mu$ A)	4.80	11.25	18.36	31.2
$\frac{1}{R_2q} (=I_2)$ ( $\mu$ A)	80.25	73.20	322.1	184.0



第6圖 順電流  $I_0$  と印加電壓  $V$  及び障壁に眞に印加されていると考えられる電壓  $V'$  との關係

僅かづつ小さくしてみた。10%以上も小さくすると大體  $V$  が1 volt 附近は直線になる。しかしこの  $R_0$  の値を用いると,  $I$  が比較的小さくて  $V$  が殆んど  $V'$  とみなしうる範圍の直線部分と明らかな折れ目を生じてしまふ。(18)式で近似出来る限りこの傾斜からも  $p$  に相當するものが求まるが、上述のように曲線になつてしまふものはこの點にも何か問題がありそうである。電流値が大きくなると  $R_0$  が小さくなるというような事があるのかもしれない。

また (16) 式を原點附近で展開すると

$$I = (I_1 p - I_2 q) V' + \frac{1}{2} (I_1 p^2 - I_2 q^2) V'^2 + \dots \quad (22)$$

となる。この式がこの附近でも正しいとすれば、その  $V'$  の係数  $a$  にあたる  $(I_1 p - I_2 q) = (1/R_1 - 1/R_2)$  の温度變化が、(勿論  $R_1, R_2$  について理論的な裏づけのある考察を行つてからでなくては推測の域にとどまるが) 接觸電位差その他の單純な量と與えるとは思われない。また

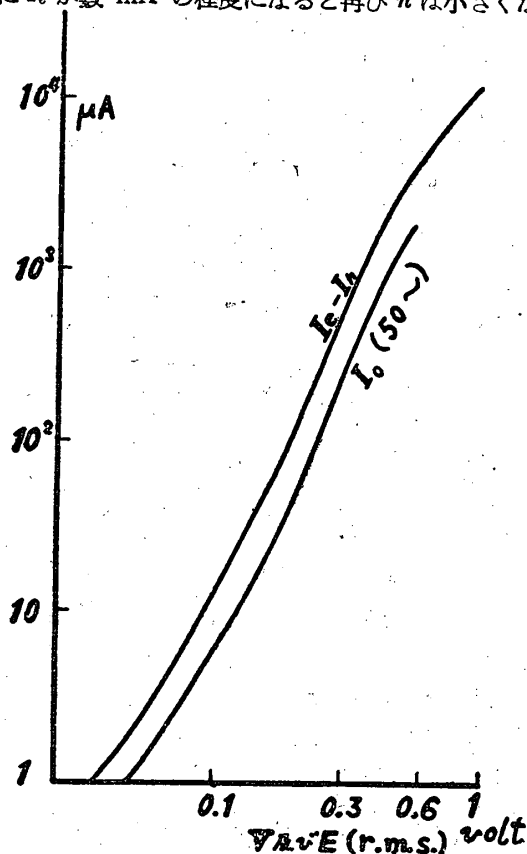
$$\frac{b}{a} = \frac{(I_1 p - I_2 q)}{2(I_1 p^2 - I_2 q^2)} \quad (23)$$

も  $e/kT$  と本質的な關係をもたないであろう。

また第7圖に示す如く、實驗的には

$$I_c - I_h = kV^n \quad (24)$$

なる關係が  $V$  のかなり廣い範圍にわたつて成立する。ここに  $V$  が十分小さい所では  $n \sim 2$  で、(6) 式の  $b$  が常數である。それより  $V$  の大きい所では一般に  $n$  は大きくなり、3 から 4 の程度になる事もある。一般に  $I_c$  が數 mA の程度になると再び  $n$  は小さくなる。



第7圖 靜特性と交流特性との關係  
これから (24), (27) 式が實驗的に成立する事がわかる。

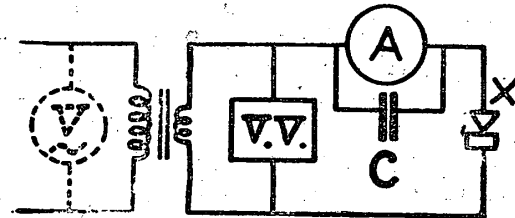
#### 4. 檢波感度について

鑽石檢波器を實用にする方面では、「感度のよい鑽石

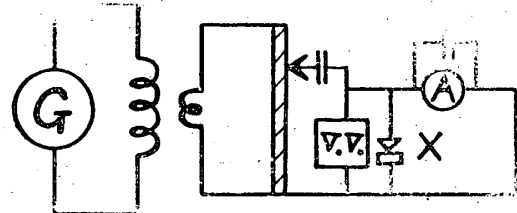
が」というような事が屢々言われるが、鑽石檢波器の感度とは極めて曖昧な言葉である。また鑽石檢波器の種々の特性の間には關連性がなく、例えば靜特性の電流比のよいものが必ずしも捩波に對する感度がよいとは限らない等とよく言われる。然し現在はそれらの關連性も比較的明らかになつてきている。ある特定の鑽石檢波器の交流や電波に對する感度は、その使用法（直接檢波、スーパーヘテロダインの變換器、高調波發生器等）と、加えられる高周波電壓と、直流または中間周波として得られた整流電流に對する負荷抵抗の値等を指定しなければ、あまり意味のないものである。従つて靜特性、商用周波數に對する特性、高周波特性、捩波特性等を比較するときは、以上の條件をそろえまたは少くとも考慮にいれて比較しなければならない。

#### 5. 交流特性

a) 實驗裝置 50 cycle 交流に對する感度特性は第8圖のような回路で測定する。C は meter の針が振動しないために入れ、10~20 μF のペーパーコンデンサーが用いられた。電壓はスライダックで變え、鑽石にかかつている電壓は内部抵抗の高い眞空管電壓計で測定し、またはトランスの一次側に交流メーターをいれて測定した。



第8圖 低周波交流に對する感度特性測定回路



第9圖 Mc 程度の高周波に對する感度特性測定の回路。なお圖のAの右側にchokeをいれる

高周波に對する特性は、ここでは1~20 Mega-cycles 程度の電波に對するものを取り扱つた。この程度までならば電氣的な技術が比較的容易で精度のよい測定が出来、電壓という量が安心して使えるからである。測定回路は第9圖に示す。Gは周波數、振幅共に可變の發振器で、UZ-6D6で發振しUZ-42を緩衝段(buffer)として用いている。整流電流  $I_0$  は電壓の2~4 乗で變化するから、電壓の測定が精度を決定す

る。従つて鑛石檢波器に印加される電波は純粹な sine 波形をしていなければならない。さらに發振器の負荷である鑛石檢波器は本質的に非直線的な要素であるから、發振器が sine 波形を保持するためには、負荷に電流が流れても發振器の電壓が變化しては困る。換言すれば發振器の内部抵抗が十分低くなくてはならない。そのために UZ-42 は直線的増幅を行う範圍を選び、その出力側のコイルに捲數の少いコイルをゆるく結合させて出力を取り出している。それを圖の二重線で示した非誘導的につくつた約 30 オームの可變抵抗器で短絡し、その一部分を取り出して鑛石檢波器に印加する。さらに鑛石檢波器の整流電流を読む電流計 A が内部抵抗  $r_i$  を持つていて、 $I_0 r_i$  だけの bias が加かつてしまうので、内部抵抗の十分小さい ( $E \gg I_0 r_i$ ) 電流計が使用せられねばならない。この實驗には  $r_i$  が數オームのものが用いられた。電壓の測定は圖の V. V. と書いた所に入力インピーダンスの高い真空管電壓計をいれて測つた。その較正は真空型熱電對で行い、場合によつては直接真空型熱電對をいれて測定した。

**b) 結果** 一般に鑛石檢波器に  $\sqrt{2} E \sin \omega t$  なる交流電壓を印加した場合に、負荷抵抗が  $R$  であるときの整流電流  $I_r$  は、(4) 式の展開がその周波數でも保たれているとき  $c$  以下を無視しうる範圍で

$$I_r = (b/a) E^2 / \{ (1/a) + R \} \quad (25)$$

である。また  $R \rightarrow \infty$  のとき即ち鑛石檢波器を直接真空管のグリッド、カソード間につないだときその兩端に出る電壓は  $b/a \cdot E^2$  である。これは鑛石檢波器を内部抵抗が  $1/a$  で起電力が  $b/a \cdot E^2$  なる電池と等價に考えてよい事を示す。(7)(8) 入射電波の勢力が微小で負荷抵抗が充分大きいとき、鑛石檢波器の感度のめやすとして  $V$  の小さい場合の  $(I_0 - I_h) / (I_0 + I_h)$  なる量が用いられ (それは (7) 式と (25) 式とを比較すれば了解される)、實用上重要な量なのでこれを整流比とよぶ。

また  $1/a$  即ち鑛石檢波器の内部抵抗に相當するものに比較して、内部抵抗  $R$  が無視しうるような電流計をつないだときの整流電流  $I_0$  は

$$I_0 = b E^2 \quad (26)$$

である。印加電壓  $E$  がさらに大きくなると實驗的には、

$$I_0 = k' E^m \quad (27)$$

なる關係が成立している。第7圖に同一の檢波器の直流特性に成立する關係 (24) と同時に示してある。圖にみられる通り兩方のグラフは大體平行して、同

一檢波器では大體  $m$  と  $n$  は等しく唯だ  $k$  と  $k'$  が異なっていると考えられる。しかしこのちがいは交流の場合  $E$  を實効値で測つている事を考えれば説明のつくものである。前者 (24) 式はいわば矩形波に對する特性と考えられる。

+數 Mc. 程度までの高周波に對する特性は、ここに用いた硅素の鑛石檢波器では實驗誤差の範圍内で 50 サイクルに對するものと一致する。従つてやはり (24) 式を満足し、靜特性がこの周波數範圍まで保存されていると考えられる。

## 6. 各特性の關係

さて (26) 式の  $b$  に (6) 式の値を用いると

$$I_0 = (I_0 - I_h) E^2 / (2 V^2)$$

故に

$$I_0 \propto (I_0 - I_h) \quad (28)$$

但しこれは  $V, E$  が充分小さくて特性曲線に二次曲線の近似が適用出来る場合である。このとき印加する電波の強度  $E$  を一定にしておけば、鑛石をかえたとき各々の檢波器に對する整流電流  $I_0$  は一定の直流電壓  $V$  を加えたときの  $(I_0 - I_h)$  に比例する。従つてこの量は鑛石檢波器のこのような負荷で電波の入力が小さい場合の感度のめやすにすることが出来る。また  $E$  がさらに大きい場合でも實驗的に (24), (27) なる關係が存在するから、印加する高周波電壓  $E$  に對應するある直流電壓  $V$  における  $I_0, I_h$  を測定すれば、 $I_0 \propto (I_0 - I_h)$  が實驗的に成立する。このように本質的には原點のごく近傍でのみ意味のある二次曲線の近似から出發した關係が、印加電壓がずっと大きな所でも係數を少く變えれば實用的に成り立つのは一寸不思議であるが、原點に近い部分は抵抗が高いので、整流電流は振幅の一番大きな部分に對する特性が全體を支配してしまふからだと考えれば了解がつく事である。このような負荷に對する  $(I_0 - I_h)$  による感度のめやすは、第2報に述べる如く特性が極めて異常を示す場合についてもよく成り立つようである。

このような事は負荷抵抗  $R$  が十分小さいからで、これが大きければ  $E \gg I_r R$  が成立せず、self-bias が加かつてしまつて大體特性曲線の逆電流側のみが問題になつてくるから、このような單純な結論はえられない。ただ  $E$  に對應する  $V$  を用いて (6) 式の  $1/a$  を測定すれば、これがその場合の實効的な内部抵抗で、この  $1/a$  にくらべて負荷抵抗  $R$  が大であるか小であるかによつて  $R=0$  及び  $R \rightarrow \infty$  の場合から類推する程度である。

以上は 20 Mc. 程度の周波数までの議論であるが、3000 Mc. 程度の極波に対する感度も珪素等のように静特性が大體準用出来るものでは、大體上と同様のめやすを立てられるであらう。なおその場合高周波入力を整合せしめる考慮をはらわなければならない。

しかしこれは實用上の問題であつて、(24)以下の實驗的な關係をまだ理論と關係づける段階でない事は勿論である。

## 7. 結 び

珪素検波器の静特性を 験べると、Mott, Bethe, Wilson 等のどの model をとつても、性質的にまた數值的に説明する事が出来ず

$$I = I_1(e^{pV'} - 1) - I_2(e^{-qV'} - 1)$$

なる式で表わされる。これは現在までのどの理論によつてもうまく表現することが出来ない。但し  $V' = V - IR_s$  は眞に障壁にかかつている電位差であり、 $p$  は  $e/kT$  の數分の一であり  $q$  はそのまた數分の一の程度である。これは一つの接點に互に逆方向に整流する二つの機構が存在すると假定すれば都合がよい。

また負荷抵抗が充分小さい時の整流電流は、ここに用いた珪素では 50 サイクルから 20 Mc. までにわたつて

$$I_0 = k'E^m$$

なる一つの式によつてあらわせる。

終りに、終始懇切な御指導及び御配慮を賜つた熊谷

寛夫教授に衷心より感謝する次第である。また數々の助言をいただいた霜田光一、林嚴雄兩氏はじめ多くの方々に厚く感謝の意を表する。

## 文 献 及 び 註

- (1) 電流の擔い手が電子でなくて満ちた勢力帯の正孔であつても、電荷が正であるという以外には變りがないから電子の場合だけについてのべる。
- (2) N. F. Mott : Proc. Roy. Soc. Lond. (A), 171 (1939), 27
- (3) W. Schottky : ZS. f. Phys., 113 (1939), 367.
- (4) H. A. Bethe : NDRC Div. 14 report, MIT Rad. Lab. 43-12, Nov. 23, (1942).  
これは手に入らないが H. C. Torrey and C. A. Whitmer : "Crystal Rectifier" (1948) McGraw-Hill Book Co. 及び W. E. Meyerhof : Phys. Rev. 71 (1947), 727. に引用されている。
- (5) A. H. Wilson : Proc. Roy. Soc. Lond. (A), 136 (1932), 487.  
L. Nordheim : ZS. f. Phys., 75 (1932), 434  
J. Frenkel, A. Joffe : Phys. ZS. d. Sowj., 1 (1932), 60.
- (6) H. C. Torrey and C. A. Whitmer : loc. cit.
- (7) 熊谷寛夫、霜田光一：極波 (1948 年) 河出書房 33 頁
- (8) 熊谷寛夫、霜田光一、飯尾眞、湯原二郎：物理學會誌, 2 (1947), 176.
- (9) W. E. Meyerhof : loc. cit.
- (10) J. Bardeen : Phys. Rev, 71 (1947), 717.
- (11) H. Q. North : Phys. Rev., 69 (1946), 912.

## 理工學研究所報告 第3巻 9—10 月號 豫告

### [物 理 學]

- 反射型速度變調管の試作について……………熊谷・山田・岩永  
電氣火花による極波の發振について (II)——發振機構に關する實驗……………林・阿 部  
鑽石檢波器の特性について (II)——感度の分布と周波數特性……………阿 部  
殘響法による吸音率の決定について……………五 十 嵐  
Al II のスペクトルの超微細構造……………諏 訪

### [金 屬 學]

- 異方性珪素鋼板の研究 (第1報)……………五弓・阿部・高橋  
鑄造用亜鉛合金に關する研究 (第1報). Zn-Al 系合金に及ぼす不純物の  
影響について……………和 田・笹 川

### [應 用 力 學]

- 平板の亂流熱傳達の計算……………濱

理工學研究所第5回定期講演會講演アブストラクト