

# 半導体の誘電率，損失角の一測定法について

二ノ方兼武・宮里 満

## On the Method of Measuring Dielectric Constant and Loss Angles of Semi-Conductors

Kanetake NINOKATA and Mitsuru MIYAZATO  
(Laboratory of Agricultural Electricity)

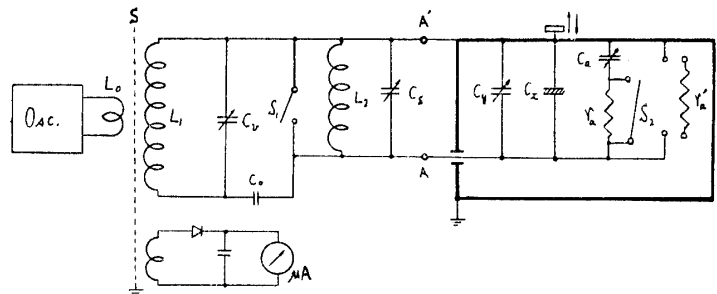
### I 緒 言

従来  $\epsilon$ ,  $\tan \delta$  の測定は，等価コンダクタンスの小さい，誘電体損失の小さな絶縁物を対象とするものであつた．最近高周波誘電加熱乾燥の産業面への応用，半導体の電氣的機構の解明，電氣的含水率測定法の考案等に対して比較的等価コンダクタンスの大きな誘電体の， $\epsilon$ ,  $\tan \delta$  を正確に測定することが必要になつてきた．この種の測定法については，一条氏の所謂複同調法<sup>(1)</sup>によるもの以外には未だ発表されていない．筆者等は木材その他の含水率とそれ等との関係を得るのに，同氏の基本原理による複同調法を用いて，コンダクタンス変化法<sup>(2)</sup>により測定手順を簡単にして同じ精度の測定値を得ることができたので，ここにその測定法の要旨を報告する．

### II 原 理

測定回路の結線を第1図に示す．  
発振器のインダクタンス  $L_0$  と，第1同調回路のインダクタンス  $L_1$  とはなるべく疎に静電的に結合させる．

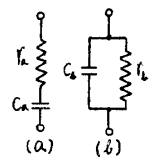
第2図(a)に示す炭素薄膜標準抵抗  $r_a$  と，力率の小さな約  $30 pF$  程度の可変コンデンサ  $C_a$  とを直列に入れた回路は，第2図(b)の  $r_b$ ,  $C_b$  の並列回路と等価であつて



第 1 図

$$r_b = \frac{1 + \omega^2 C_a^2 r_a^2}{\omega^2 C_a^2 r_a}, \quad C_b = \frac{C_a}{1 + \omega^2 C_a^2 r_a^2}$$

で表わされる．直列回路の両端子間に加わる交番電圧の周波数，従つて  $\omega$  が一定で， $r_a$  を適当な一定値にとれば等価並列回路の  $r_b$ ,  $C_b$  は  $C_a$  を変えることによつて変化する．例えば，発振周波数が  $1 MC$  のとき  $r_a$  をパラメータにとつて  $C_a$  に対する  $r_b$ ,  $g_b = 1/r_b$ ,  $C_b$  の値を計算して曲線に描けば第3, 4, 5図のようになる．このように  $r_a$ ,  $C_a$  を直列につないで  $C_a$  を連続的に変えるときは， $r_b$ ,  $C_b$  の並列インピーダンスの各素子の値を連続的に変えるのと同じことになる．



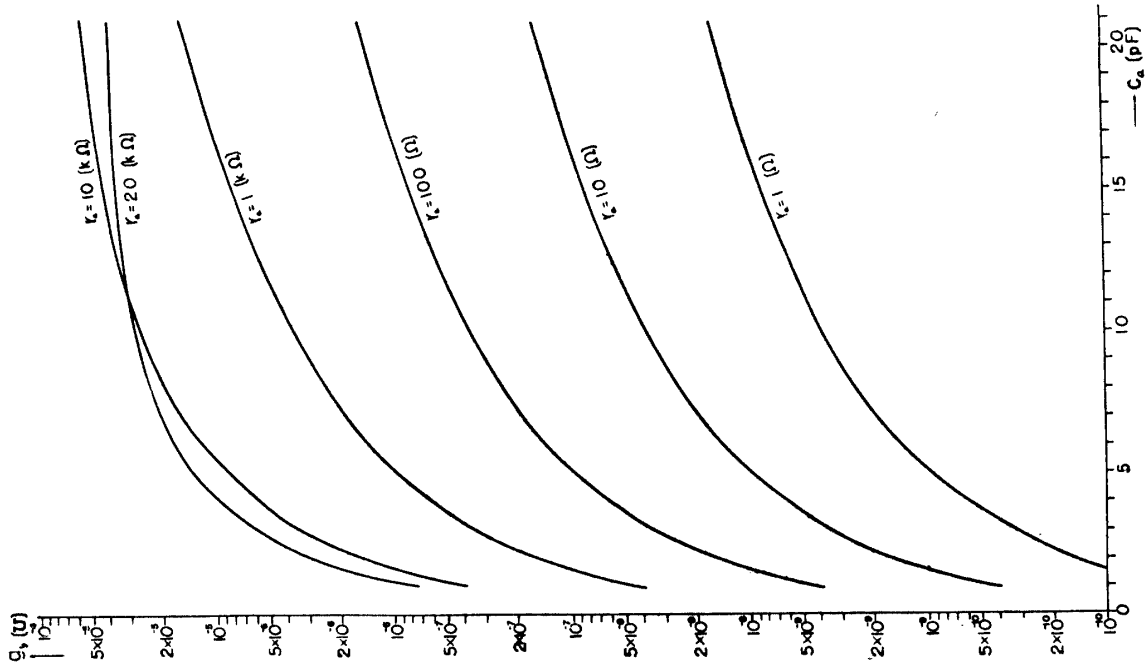
第 2 図

但し  $C_b$  は  $\omega C_a r_a \leq 0.1$  のときは  $C_b \doteq C_a$  となつて直線的に変化する．

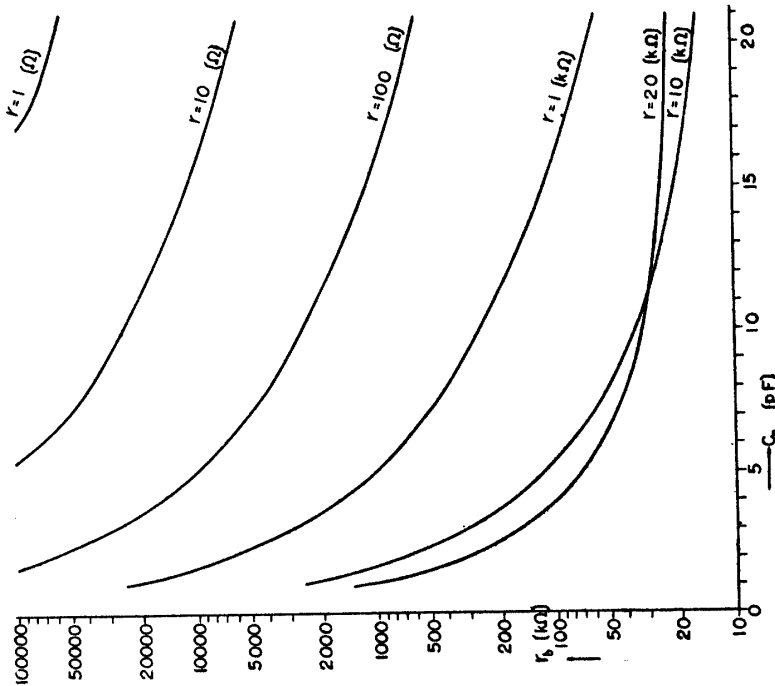
試料挿入用コンデンサの電極間に試料を入れ，上部電極を引き下して適當の圧力を加えるとき， $R_x$ ,  $C_x$  の等価並列回路で表わすことができる．従つてこの回路を  $r_a$  と  $C_a$  とを直列にしたものと，

$C_y$ との並列回路で置き換え  $R_x$  と  $R_b$  と等しくなるように  $C_a$  を調整し,  $C_x$  と  $C_b + C_y$  と等しくなるように  $C_y$  を調整すれば,  $R_x, C_x$  を  $R_b, C_b + C_y$  と置換することができる。

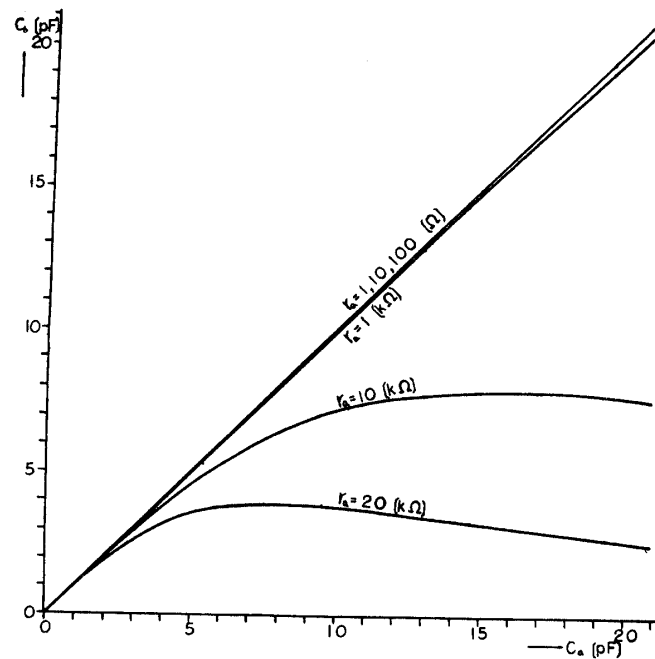
なお試料の等価並列コンダクタンス  $g_x$  が大きく,  $r_a$  だけでは調整できないときには更に  $r_a'$  を並列に入れる。今発振周波数を  $1\text{MC}$  としたとき,  $r_a = 10^k \Omega$ ,  $r_a'$  として  $4^k, 5^k, 7^k, 10^k, 20^k$  (単位  $\Omega$ ) を入れたばあいの等価並列抵抗  $r_b'$  を示せば第6図のようになる。



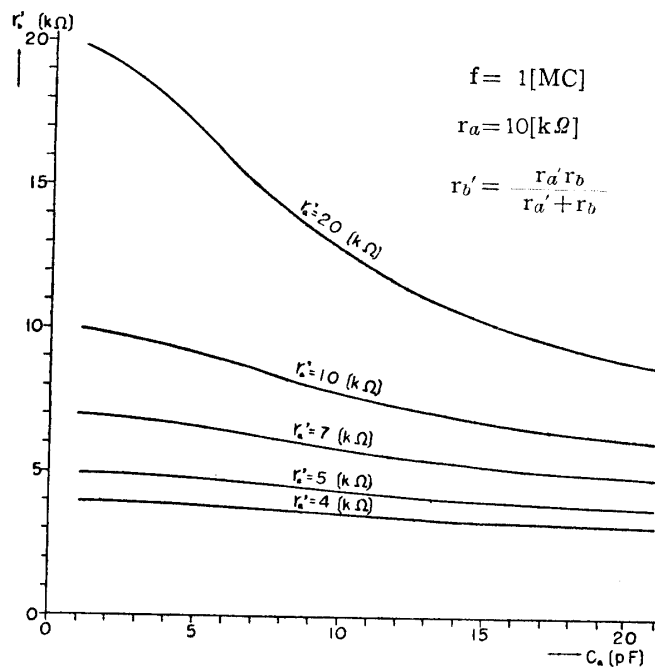
第 4 図



第 3 図



第 5 図



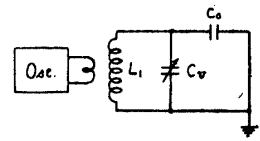
第 6 図

### III 測定法

発振器は自励式のハートレー回路を用い，バーニア付目盛円盤の目盛に対する周波数はヘテロダイン周波計で正密に校正して置く．測定法は第1図において

(1)  $S_1$  を閉じ， $C_0$  を調整して第1同調回路を発振周波に同調させて指示計器の電流  $I_0$  を最大にする．このときの回路は次の第7図のようになる．

(2)  $C_v$  はそのままにして  $S_2$  を閉じ試料を試料コンデンサに入れ、 $C_v$  をなるべく小さな適当値  $C_{vK}$  (普通最小値にする) に、 $C_a$  は最小値  $C_{a0}$  にし  $S_1$  を開いて後  $C_s$  を調整し  $\omega(C+C_0) = \frac{1}{\omega L_2}$  (但し  $C = C_s + C_{vK} + C_x + C_{a0}$ ) を満足するようにすれば、すなわち  $C_s = \frac{1}{\omega^2 L_2} -$



第 7 図

$C_{vK} - C_x - C_{a0} - C_0$  になるようにすれば  $C_p = C_0$ ,  $R_{p \min} = \frac{1}{\omega^2 C_0^2 R}$  (但し  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_x}$ ) となり  $I_0$  は最小となる。このときの  $I_0$  の最小値を  $I_{01}$  とする。またこのときの等価回路は第 8 図 (a), (b), (c) のようになる。

(3)  $C_v, C_s, C_{a0}$  はそのままとして試料コンデンサの上部電極 (地絡側) はなるべく下部電極より引離してその空隙を大きくして一定の位置に置く、このときの試料コンデンサの容量を  $C_{x0}$  とする。そして  $C_v$  を調整して  $C_{v1}$  とし、 $\omega(C+C_0) = \frac{1}{\omega L_2}$  (但し  $C = C_s + C_{v1} + C_{x0} + C_{a0}$ ) を満足するようにすれば、すなわち  $C_{v1} = \frac{1}{\omega^2 L_2} - C_s - C_{x0} - C_{a0} - C_0$  にすれば  $C_p = C_0$ ,  $R_{p \min} = \frac{1}{\omega^2 C_0^2 R}$  (但し  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0}$ ) となり  $I_0$  は最小となる。(このときの  $I_0$  の最小値を  $I_{02}$  とする。)

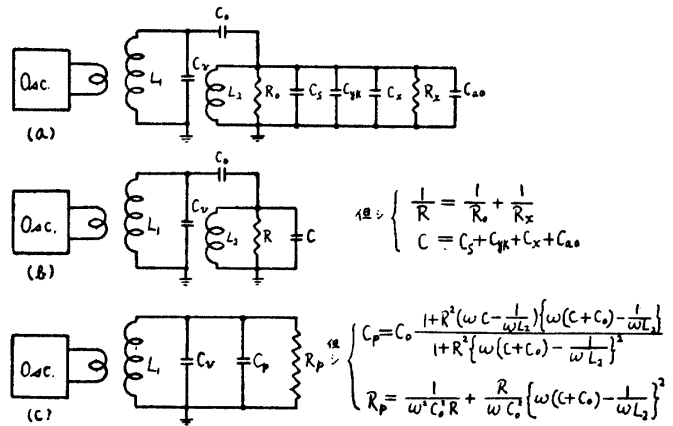
然るときは試料を入れたときの試料コンデンサの容量  $C_x$  は

$$C_x = C_{v1} - C_{vK} + C_{x0} \quad (1)$$

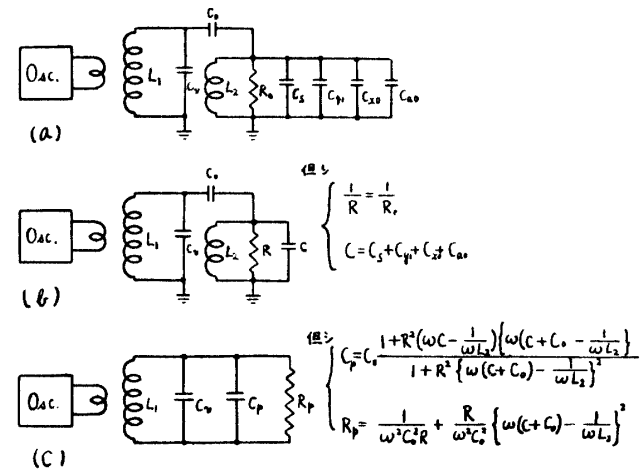
となる。

このときの等価回路は第 8 図 (a), (b), (c) のようになる。

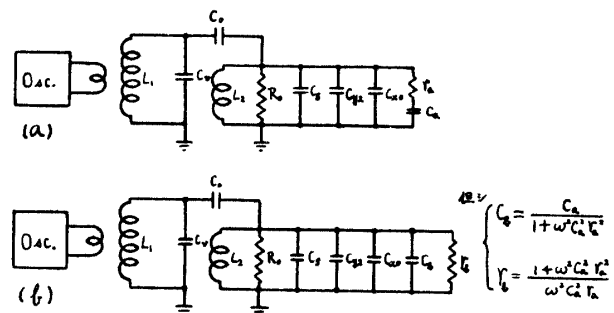
(4)  $C_v, C_s, C_{x0}$  はそのままにして置いて  $S_2$  を開き、適当な値の炭素被膜標準抵抗  $r_a$  が  $C_a$  と直列になるようにして  $C_a$  を漸次大きくしながら  $C_v$  を調整して  $I_0$  が最小となるようにし、 $I_{0 \min}$  の値が第 2 段階での  $I_{01}$  と一致するときの  $C_a$  の値と  $C_v$  の値  $C_{v2}$  とを求める。なおこのときの等価回路は第 10 図 (a), (b) のようになる。



第 8 図



第 9 図



第 10 図

$R_x$  は第 8 図 (a) と第 10 図 (b) とを比較して

$$R_x = r_b = \frac{1 + \omega^2 C_a^2 r_a^2}{\omega^2 C_a^2 r_a} \quad (2)$$

また

$$G_x = \frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_b} = \frac{\omega^2 C_a^2 r_a}{1 + \omega^2 C_a^2 r_a^2}$$

(1) 式, (2) 式により  $C_x, R_x$  が判れば誘電正接は,

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_x R_x} \quad (3)$$

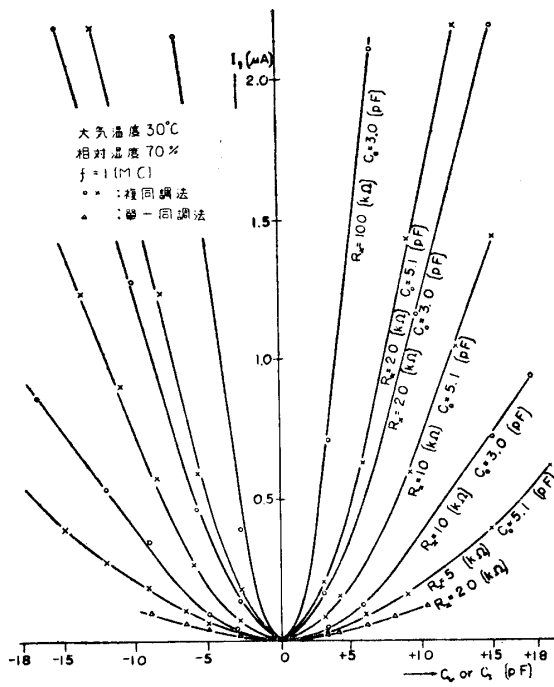
により求めることができる。

誘電率  $\epsilon$  は、試料を誘電体とするコンデンサの指定周波数における等価並列静電容量と、試料を抜いて誘電体を空気としたばあいの静電容量との比で求められる。

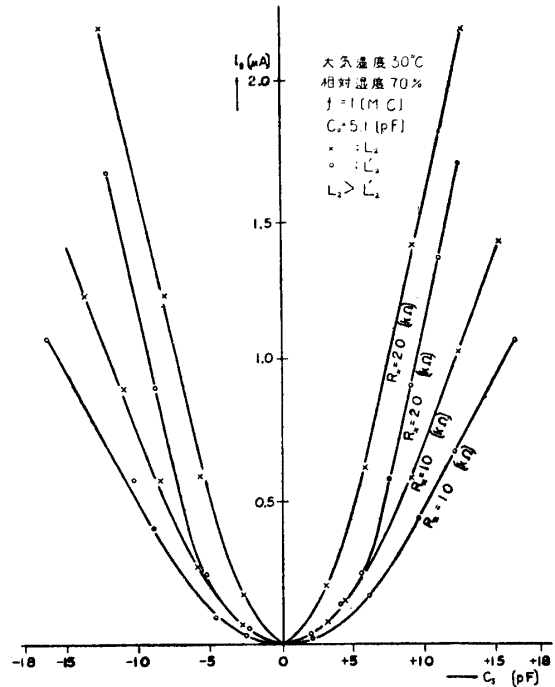
#### IV 実験結果及びその考察

回路の特性は一条氏の複同調測定法のばあいと全く同一になることは明らかで、たとえば第二同調回路の  $S_2$  を閉じて、 $r_b$  の種々の値を入れたばあいに、 $C_s$  を変えて  $I_g$  の変化を示せば第 11 図のような  $V$  曲線になる。このばあい、縦軸は  $I_{g \min}$  を零にとり、横軸は  $I_g$  が最小となる  $C_s$  の値を原点にとつたものである。また単一同調法のばあいを比較のために併せてプロットしてある。このときは縦軸には  $I$  の最大値  $I_{g \max}$  を基準の零にとつてある。このように単一同調法に比べて  $I_g$  の変化は急峻であつて、 $R_x$  の小さな誘電体も測定可能になる。

今種々の試料について両法で測定した結果を示せば第 1 表のようになつて、実験誤差の範囲内で両者は一致している。



第 11 図



第 12 図

第 1 表 測定年月日 1955 年 7 月 23 日 大気温度 28°C 相対湿度 82%

	試料の種類	厚サ(mm)	$C_x$ (pF)	$R_x$ (kΩ)	tanδ	δ
複 同 調 法	ガラス板	3.085	49.15	380	0.00853	8.7
	ベークライト板	3.088	49.25	86	0.0376	8.7
	硬質ビニール板	5.026	17.65	880	0.0102	5.1
	ヒノキ板(半乾)	14.50	13.45	150	0.788	11.2
	ヒノキ板(湿潤)	14.50	22.95	13.65	0.509	19.17
単 一 同 調 法	ガラス板	3.085	48.95	360	0.00923	8.7
	ベークライト板	3.088	48.95	81	0.0401	8.7
	硬質ビニール板	5.026	17.45	820	0.0111	5.1
	ヒノキ板(半乾)	14.50	13.15	155	0.787	11.0
	ヒノキ板(湿潤)	14.50	測定不能			

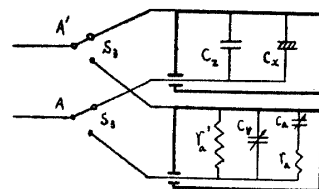
この測定法は複同調法とコンダクタンス変化法との両法の注意すべき点を考慮に入れて、設計し測定しなければならない。すなわちまず第一同調回路の同調が正確に行われて後、第二同調回路の同調をとること（複同調法一測定）、できるだけ小さな  $C_s$ ,  $C_v$  等の値で同調すること（コンダクタンス変化法一設計、測定）などが必要となる。今共振時に  $L_2$  に 並列に入る全静電容量の小さいばあいと大きいばあいに、感度が如何に変化するかを実測してみると、第 12 図のようになる。これによつてもでき得る限り  $C_s$ ,  $C_v$  等は小さくする必要があることがわかる。

この測定法ではできるだけ測定を簡易にするために、コンダクタンス変化法は切換えスイッチを用いながつたが、第 1 図の AA' より右側を第 13 図のように対称にして比較すれば、更に感度を上げることができる。

なお  $C_x$  は式 (1) より求められるが

$$C_x = C_{y2} - C_{yK} + C_{x0} + C_b$$

$$= C_{y2} - C_{yK} + C_{x0} + \frac{C_a}{1 + \omega^2 C_a^2 r_a^2} \quad (1')$$



$C_2 = (C_v \text{の最小容量}) + (C_x \text{の最大容量}) - (C_x \text{の非対称地側電極と遮蔽筒の容量})$

第 13 図

よりも求め得るから、この式からも  $C_x$  を求めて (1) 式の  $C_x$  と較べて確かめてみるができる。

測定法の (4) の段階で  $C_a$  を漸次大きくしながら  $C_v$  を調整し  $I_{g \min}$  が  $I_{g1}$  と一致するようにすることは極めて困難に見えるが、これは実際は至つて平滑に一致点を見出すことができる。

算出式 (3) にみるように、 $\tan \delta$  の計算には  $\omega = 2\pi f$  が入ってくるが、発振周波をヘテロダイーン周波計で正確に校正すれば、周波数の誤差は少くすることができる。この計算のばあい、一定の発振周波数に対する  $r_b$ ,  $C_b$  等を第 3 ~ 6 図のようにグラフに描いておけば、ただちにその発振周波数における  $\tan \delta$  を求めることができる。

## V 結 言

複同調法とコンダクタンス変化法とを並用することによつて、測定精度を下げることなく、半導体の  $\tan \delta$  の測定手順を簡易化することができた。

この測定装置はそのまま広範囲の含水率をもつ材料の含水率計となるが，勿論直読型ではない。又高周波加熱の際の乾燥度とサセプタンスとの関係を知つて，インピーダンス整合にも役立てることができるであろう。其の他高周波滴定など応用範囲は広いが実用計器としては尙今後の研究にまたなければならない。

本実験を行うにあたり，実験装置の製作並びに測定等，二石規雄君の尽力に負うところが多かつた。ここに記して謝意を表する。

## 文 献

- 1) 一条・新井：電学誌 **74** (789), 263 (1954).
- 2) 電気絶縁材料試験法専門委員会第4小委員会：電気学会技術報告, **3**, (1955).

## *R é s u m é*

The process of measuring  $\tan \delta$  of semi-conductors was symplified, by means of combining the double resonance method and variable conductance method, without refucing the accuracy of the measurement.

This measuring apparatus may be used as it is for moisture contentmeter of materials which have wide ranged moisture content, but does not belong to a direct-reading type. In case of radio heating, it may also be used for impedance matching, by measuring the relation between the moisture content and the susceptance. It has wide application, such as high frequency titration, but it needs much more improvements for practical use.