

# 卒業研究報告

題目

ダイオードの耐圧自動測定・評価

---

指導教員

河津 哲教授

---

報告者

学籍番号: 1030181

氏名: 片岡 隆司

---

平成 15年 2月 3日

高知工科大学 電子・光システム工学科

## 目次

1 . はじめに	1
2 . 原理・理論	
2 . 1 PN接合	2
2.1.1 順方向性	2
2.1.2 逆方向特性	4
2 . 2 接合容量	5
2.2.1 濃度と耐圧の関係	5
2 . 3 耐圧	12
2.3.1 アバランシェ破壊	12
2.3.2 ツェナー破壊	14
2.3.3 二次破壊	15
3 . 耐圧測定	
3 . 1 自動測定システムの説明	16
3 . 2 測定回路	17
3.2.1 電圧計	17
3.2.2 電流計	17
3.2.3 DC 電源	17
3 . 3 測定精度	17
3.3.1 印加電圧の精度	17
3.3.2 自動測定システムの精度	17
4 . 測定方法	
4 . 1 測定方法の検討	19
4 . 2 ダイオード別測定方法	21
4.2.1 耐圧 2.4 [V]	21
4.2.2 耐圧 6.2 [V]	21
4.2.3 耐圧 30 [V]	22
5 . 測定及び考察	
5 . 1 ダイオード別測定及び考察	23
5.1.1 耐圧 2.4 [V]	23
5.1.2 耐圧 6.2 [V]	24
5.1.3 耐圧 30 [V]	26
6 . おわりに	29
7 . 謝辞	30
参考文献	31

## 付録

- 1 . 抵抗の V I 特性自動測定プログラム
- 2 . 耐圧 2.4 [V]ダイオードの V I 特性自動測定プログラム-----32
- 3 . 耐圧 6.2 [V]ダイオードの V I 特性自動測定プログラム-----34
- 4 . 耐圧 30 [V]ダイオードの V I 特性自動測定プログラム-----36

## 1. はじめに

戦後まもない頃、日本の企業の商品開発で求められていたことは便利で新しい物を作りだすことだった。まだ未開の領域が多く、世の中は不便なことばかりであった。そういった土壌から今日の大企業が生まれたのである。

現在の日本は企業の努力の甲斐もあり便利で豊かになった。大よそ想像できる物は作り尽くしてしまった感もある。このような世の中で企業の商品開発に求められることは、スピードと正確さではないだろうか。ライバルより一歩遅れてしまっただけで平成不況と言われる今、生き残って行くことは難しくなってしまう。

今回私が行った研究では、ダイオードの逆方向の  $V-I$  特性を測定した。ダイオードの破壊電圧を測定するには数百から数千点の測定をしなければならない。しかも、二次破壊の負性抵抗部分を測定するには指数関数で増える電流を細かく測定する必要がある。このような作業を一つ一つ手作業で行うのは時間がかかり不正確である。しかし、コンピューターであれば文句一つ言わずに素早く正確に作業を行ってくれる。自動計測で素早く正確に結果を出すという考え方を、学生のうちから身に付けることが就職を控えた私たちが必要であると感じている。また、自動計測の結果を鵜呑みにせず、本当に自分の知りたいことが計れているのか確かめる方法も考えなければならない。以上のことを踏まえ、卒業研究を行った。

## 2. 原理・理論

### 2.1 PN接合

#### 2.1.1 順方向特性

図1はバイアス電圧がゼロのときのPN接合の空乏層を示したものである。接合を通過する正味の電流はゼロであるが、このような状態においてもキャリアは完全に静止しておらず、熱運動のためにその一部はつねに接合に向かって両側から動いている。しかしその大きさは常に等しく、方向が逆なので外部に電流として現れない。平衡状態にあるPN接合は、接合を通る電子による電流がゼロであり同じく正孔による電流もゼロである。これらの電流は図1のように4つの成分に分けられる。

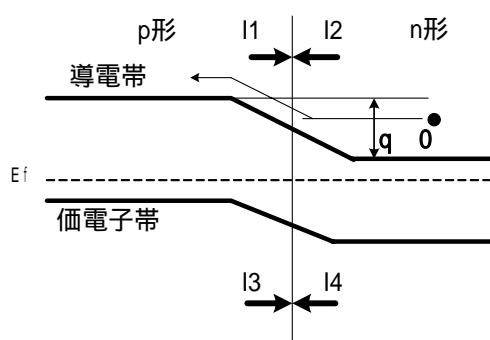


図1 ゼロバイアス時の電流成分

接合には電流が流れていないので  $I_1 = I_2$  となる。 $I_2$  が電位障壁  $q\phi_0$  を乗り越える確率は  $\exp(-q\phi_0/kT)$  に比例する。したがって、

$$I_1 = I_2 = I_0 \exp(-q\phi_0/kT) \quad (I_0 \text{ は比例定数}) \quad \dots (1)$$

同様に  $I_3$ 、 $I_4$  も同じ大きさで向きが逆なので互いに打ち消し合う。したがって

$$I_3 = I_4 = I_0' \exp(-q\phi_0/kT) \quad (I_0' \text{ は比例定数}) \quad \dots (2)$$

と表わせる。

接合にかかる電圧は p 側が正、n 側が負の極性のとき PN 接合は電流が流れやすい状態にある。この状態を順バイアスという。順バイアスのとき、n 側に対して p 側の電位が上昇する。

エネルギー帯図が図 2 のように変化したとき、印加電圧を  $V_a$  とすると、障壁の高さ  $\phi_0$  は  $V_a$  だけ減じて  $\phi_0 - V_a$  になる。

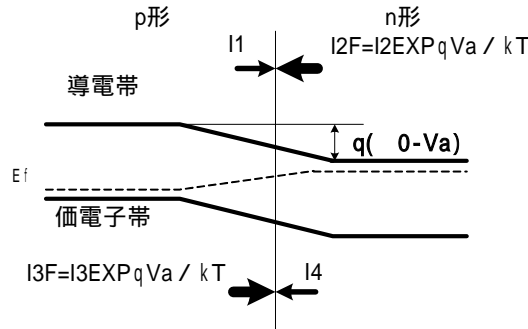


図 2 順バイアス時の電流成分

このような状態においては、p 側から n 側へ向かう少数キャリアの電子が作る電流は、障壁が変わってもその影響を受けないので印加電圧がゼロのときと同じ値である。n 側から p 側へ向かう多数キャリアの電子に対しては、障壁の高さが  $V_a$  分だけ低くなるのでその分だけ障壁を乗り越える電子の数は増加する。このときの電流を  $I_2 F$  とすると電位障壁は、 $\phi_0 - V_a$  になる。式 ( 1 ) と同じ関係が成立して、

$$\begin{aligned} I_2 F &= I_0 \text{EXP}\{ q( \phi_0 - V_a ) / kT \} \\ &= I_0 \text{EXP}( - q \phi_0 / kT ) \cdot \text{EXP}( qV_a / kT ) \cdot \dots ( 3 ) \end{aligned}$$

となる。式 ( 1 ) より、

$$I_2 F = I_1 \text{EXP}( qV_a / kT ) \quad \dots ( 4 )$$

となり、バイアスがゼロのときの電流  $I_1$  の  $\text{EXP}( qV_a / kT )$  倍に増加する。図 2 から分かる様に接合を横切る正味の電子電流は  $I_2 F$  から  $I_1$  を差し引いたものになり、

$$I_2 F - I_1 = I_1 \{ \text{EXP}( qV_a / kT ) - 1 \} \quad \dots ( 5 )$$

となる。電流としての向きはこれとは逆になり、p 側から n 側に流れている。正孔電流についても同じように求めることができる。n 側から p 側に流れる少数キャリアの正孔電流はバイアスがゼロのときと同じ  $I_4$  のままである。p 側から n 側に流れる正孔電流  $I_F$  はバイアス  $V_a$  だけ流れやすくなり、電子の場合と同じ様に  $I_0 \text{EXP}\{ q( \phi_0 - V_a ) / kT \}$  で表わされ、

$$I_3 F = I_4 \text{EXP}(qV_a / kT) \quad \dots (6)$$

となる。したがって、接合を横切る正味の正孔電流は  $I_3 F$  と  $I_4$  の差となり、

$$I_3 F - I_4 = I_4 \{ \text{EXP}(qV_a / kT) - 1 \} \quad \dots (7)$$

で表わされ p 側から n 側へ流れる。

接合を横切る順方向の電流  $I_F$  は、電子電流と正孔電流の和となり、いずれも p 側から n 側の向きである。したがって、式 (5) (7) より、

$$I_F = (I_1 + I_4) \{ \text{EXP}(qV_a / kT) - 1 \} \quad \dots (8)$$

となる。  $I_1 + I_4$  を  $I_s$  とおくと順電流の一般式を、

$$I_F = I_s \{ \text{EXP}(qV_a / kT) - 1 \} \quad \dots (9)$$

と得ることができる。

### 2.1.2 逆方向特性

p 側が n 側に対して負の極性のとき逆バイアス状態である。 図 3 は逆バイアス状態のエネルギー帯図である。

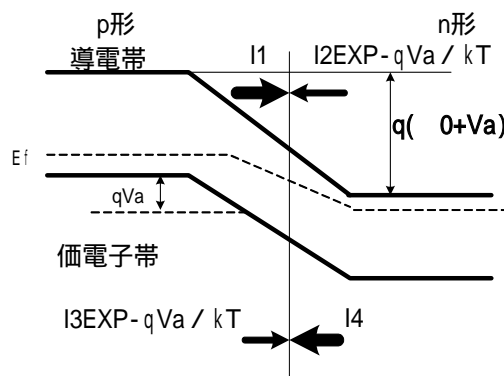


図 3 逆バイアス時の電流成分

電位障壁は逆印加電圧  $V_a$  だけ増加して、 $(\phi_0 + V_a)$  となる。式 (1) と同じ関係が成り立ち、

$$I_{2R} = I_0 \exp\left\{ -\frac{q(\phi_0 + V_a)}{kT} \right\} \\ = I_0 \exp\left( -\frac{q\phi_0}{kT} \right) \cdot \exp\left( \frac{qV_a}{kT} \right) \quad \dots (10)$$

となる。少数キャリアによる電流は障壁の妨害がないので、 $V_a$  の影響を受けず一定値を示す。式 (5) より接合を横切る正味の電子電流は、

$$I_{2R} - I_1 = I_1 \{ \exp(-\frac{qV_a}{kT}) - 1 \} \quad \dots (11)$$

となる。

正孔電流も同じく順方向特性と同じ関係が成り立つので、式 (7) より、

$$I_{3R} - I_4 = I_4 \{ \exp(-\frac{qV_a}{kT}) - 1 \} \quad \dots (12)$$

となる。したがって、逆方向の全電流  $I_S$  は電子と正孔の電流の和となり、

$$I_R = (I_1 + I_4) \{ \exp(-\frac{qV_a}{kT}) - 1 \} \quad \dots (13)$$

と表わされる。 $I_1 + I_4$  を  $I_S$  とおくと逆電流の一般式、

$$I_R = I_S \{ \exp(-\frac{qV_a}{kT}) - 1 \} \quad \dots (14)$$

が得られる。

## 2.2 接合容量

### 2.2.1 濃度と耐圧の関係

p-n 接合に電圧  $V$  が印加されると空乏層の幅が変わる。空乏層の幅を  $W$ 、接合の面積を  $A$  とすると、p-n 接合が示す静電容量  $C_T$  は

$$C_T = A \cdot \epsilon_0 / W \quad \dots (15)$$



で与えられる。  $\epsilon_0$  は真空誘電率、  $\epsilon_r$  は半導体材料の比誘電率である。したがって CT はバイアス電圧により変わる。CT は接合容量と呼ばれ空間電荷層による容量である。

p-n 接合の空乏層は図 4 に示すように、p 側の負のアクセプタイオンに満ちた領域と、n 側の正のドナーイオンに満ちた領域とからできている。

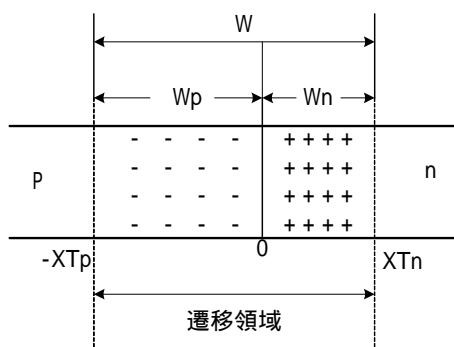


図 4 p-n 接合の遷移領域

電荷は空乏層全体に分布しており、分布の幅は接合にかかる電圧の関数であるので、接合容量は、

$$CT = dQ / dV_T = dQ / dW \cdot dW / dV_T \quad \cdot \cdot (16)$$

となる。接合の空乏層にかかる電圧を  $V_T$ 、空乏層の幅を  $W$ 、空乏層中の正か負のいずれか片側の電荷量を  $Q$  とする。この計算を p 側か n 側いずれかの空乏層について行えばよい。

空乏層は、図 5 に示すように、p-n 境界を  $x = 0$  として、p 側では、 $-X_{Tp}$ 、n 側では  $X_{Tn}$  まで広がっているものとする。ドナーとアクセプタ密度をそれぞれ  $N_d$ 、 $N_a$  とし、空乏層内ではこれらの不純物原子はすべてイオン化しているものとして、電荷密度は p 側では  $-qN_a$ 、n 側では  $qN_d$  となる。

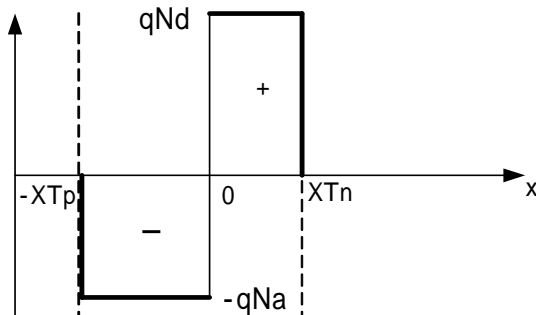


図 5 空間電荷分布

図5に示すようにpからnへの不純物分布が階段状に変化している階段接合の場合について空乏層内の、p側の電位  $\phi_1$  とn側の電位  $\phi_2$  は、それぞれの空間電位密度からポアソン方程式を解くことによって求めることができる。p側においては、図5に示すように  $-X_{Tp} \leq X \leq 0$  で  $\rho = -qN_a$  なので、

$$\frac{d^2 \phi_1}{dX^2} = qN_a / \epsilon_0 \epsilon_r \quad \cdot \cdot (17)$$

ここで、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $\epsilon_r$  は半導体の比誘電率である。n側においては、図5に示すように  $0 \leq X \leq X_{Tn}$  で  $\rho = qN_d$  であるから、

$$\frac{d^2 \phi_2}{dX^2} = -qN_d / \epsilon_0 \epsilon_r \quad \cdot \cdot (18)$$

p側、n側の電界は(17)、(18)を積分することによって求めることができる。

$$\frac{d\phi_1}{dX} = qN_a / \epsilon_0 \epsilon_r X + K_1 \quad \cdot \cdot (19)$$

$$\frac{d\phi_2}{dX} = -(qN_d / \epsilon_0 \epsilon_r) X + K_2 \quad \cdot \cdot (20)$$

$K_1, K_2$  は積分定数である。

図6に示すように、 $V_T$  は空乏層だけにかかっているためp領域の電位をゼロにとると、 $X_{Tn}$  における電位は  $V_T$  となる。

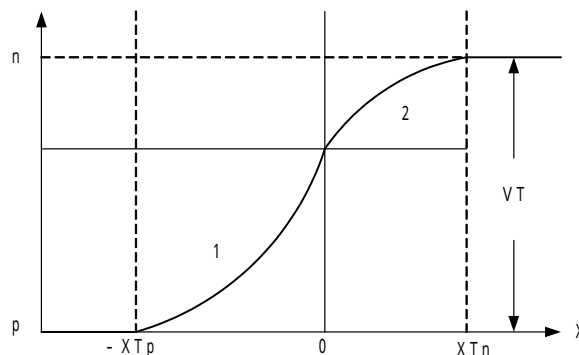


図6 静電電位

1、 2はそれぞれ  $-X^T p$ 、 $X^T n$  で一定値になるので境界条件は、

$$X = -X^T p \text{ に対して } \phi_1 = 0 \quad d\phi_1 / dX = 0 \quad \dots (21)$$

$$X = X^T n \text{ に対して } \phi_2 = VT \quad d\phi_2 / dX = 0 \quad \dots (22)$$

式(21) (22) を式(19) (20) に入れて

$$\frac{d^2 \phi_1}{dX^2} = qNa / r_0 (X + X^T p) - X^T p \quad X = 0 \quad \dots (23)$$

$$\frac{d^2 \phi_2}{dX^2} = qNd / r_0 (-X + X^T n) \quad 0 \leq X \leq X^T n \quad \dots (24)$$

電位  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  は式(23) (24) を積分して、

$$\phi_1 = qNa / r_0 (X^2 / 2 + X^T p X) + K1' - X^T p \quad X = 0 \quad \dots (25)$$

$$\phi_2 = qNd / r_0 (-X^2 / 2 + X^T n X) + K2' \quad 0 \leq X \leq X^T n \quad \dots (26)$$

式(21)の境界条件より  $X = -X^T p$  において、 $\phi_1 = 0$  なので、これを式(25) に入れると、

$$K1' = (qNa / r_0)(X^T p^2 / 2) \quad \dots (27)$$

$K1'$  を式(25) に入れると、

$$\phi_1 = qNa / 2 r_0 (X + X^T p)^2 - X^T p \quad X = 0 \quad \dots (28)$$

同様に式(22)の境界条件より  $X = X^T n$  で  $\phi_2 = VT$  なので、これを式(26) に入れると、

$$K2' = VT - (qNd / r_0)(X^T n^2 / 2) \quad \dots (29)$$

K 2'を式(26)に入れると

$$2 = V_T - qNd/2 \quad r = 0 \quad (X - X_{Tn})^2 \quad \cdot \cdot (30)$$

p n境界の X = 0 で、電位、電界 d / dX は連続なので、

$$1 = 2 \quad d_1 / dX = d_2 / dX$$

が成立する。この境界条件より式(28)(30)から、

$$(qNa/2 \quad r = 0) \cdot X_{Tp}^2 = V_T - (qNd/2 \quad r = 0) X_{Tn}^2 \quad \cdot \cdot (31)$$

を得る。同様に式(23)(24)から、

$$NaX_{Tp} = NdX_{Tn} \quad \cdot \cdot (32)$$

が得られる。これは図5において、p側とn側の空間電荷の総量は等しいことを意味している。

空乏層幅を求めるために、式(32)より

$$X_{Tn} = Na / Nd X_{Tp} \quad \cdot \cdot (33)$$

これを式(31)に入れると、

$$(qNa/2 \quad r = 0)(1 + Na/Nd) X_{Tp}^2 = V_T$$

となる。これよりp側の空乏層 X<sub>TP</sub>は、

$$X_{Tp} = \{ (2 \quad r = 0 / q)(Nd / Na (Na + Nd)) \}^{1/2} \cdot V_T^{1/2} \quad \cdot \cdot (34)$$

式(34)を用いてn側の空乏層 X<sub>Tn</sub>を求めると、

$$X_{Tn} = \left\{ \left( \frac{2 r_0}{q} \right) \left( \frac{N_d}{N_a (N_a + N_d)} \right)^{1/2} \right\} \cdot V_T^{1/2} \quad \cdot \cdot (35)$$

となる。式(34)、(35)の和が全体の空乏層幅Wとなり、

$$W = X_{Tn} + X_{Tp} = \left( \frac{2 r_0}{q} \right) \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)^{1/2} \cdot V_T^{1/2} \quad \cdot \cdot (36)$$

を求めることができる。

p-n接合では片方の不純物密度が他方に比べて桁違いに大きいので、どちらか一方に近似でき式(36)は、

$$W \approx \left( \frac{2 r_0}{q} \right) \left( \frac{1}{N_d} \right)^{1/2} \cdot V_T^{1/2} \quad N_a \gg N_d \quad \cdot \cdot (37)$$

となる。

式(16)より接合容量を求める。n側について考えることとし、n側の遷移領域の幅をWnとすると、

$$\frac{dW_n}{dV_T} = \left\{ \frac{r_0 N_a}{2 q N_d (N_a + N_d)} \right\}^{1/2} \cdot V_T^{-1/2} \quad \cdot \cdot (38)$$

となる。dQnはWnがdWn変化したときの空乏層の体積変化をAdWnとすると、これに電荷密度を掛け

$$dQ_n = q A dW_n \quad \cdot \cdot (39)$$

となる。式(38)、(39)を式(16)に入れると、

$$C_T = \frac{dQ}{dV_T} = \frac{dQ}{dW} \cdot \frac{dW}{dV_T} = A \left\{ \left( \frac{q r_0}{2} \right) \cdot \frac{N_a N_d}{(N_a + N_d)} \right\}^{1/2} \cdot V_T^{-1/2} \quad \cdot \cdot (40)$$

で表わされる。

VTと印加電圧VとはVT = ±Vの関係である。式(36)より順方向に電圧を増すと接触電位差からVが引かれVTが減少するのでWが減少し、逆方向に電圧を

増すと に  $V$  が足され  $W$  が増加する。接合容量はこれらに対応して増減する。階段接合ダイオードの接合容量と逆印加電圧の関係は、

$$C_T \propto V_T^{-1/2} \quad \dots (41)$$

で表わすことができる。図7は逆印加電圧  $V$  と容量  $C_T$  による  $C - V$  特性である。

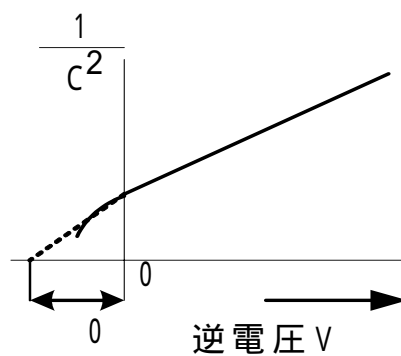


図7 ダイオードの  $C - V$  特性

このグラフからドナー、アクセプタの濃度  $N_a$ 、 $N_d$  を読むことができる。 $V_T$  を耐圧とすると式 (37) より、

$$BV = (1/2)(qN)^2 W^2 \text{ MAX} \quad \dots (42)$$

となる。グラフから読んだ  $N$  を式 (42) に入れると耐圧を求めることができる。

## 2.3 耐圧

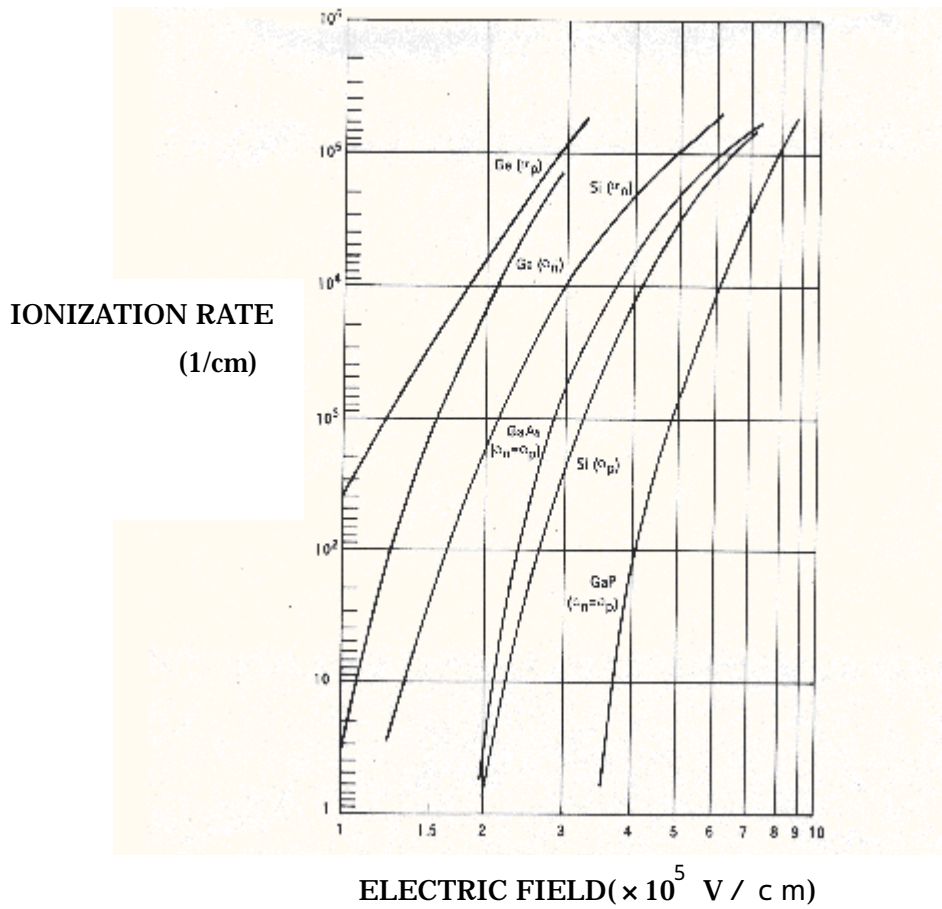
試料として公称ツェナーダイオードを用いたが、破壊機構としてアバランシェ破壊とツェナー破壊を含んでいるダイオードである。

### 2.3.1 アバレンシェ破壊

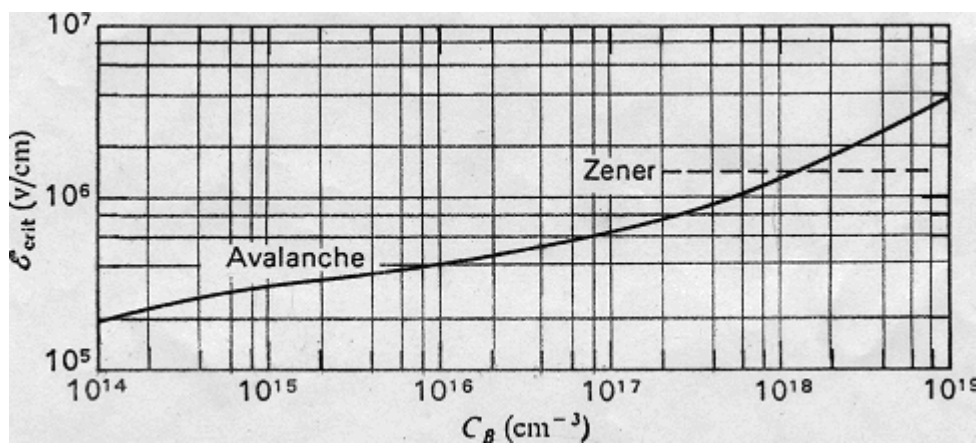
ダイオードに逆電圧をかけて行くと空乏層の電界が大きくなる。これによって電離破壊が発生する。発生した電子・正孔が電界からエネルギーを得て次々と電離破壊が発生する現象をアバランシェ破壊と言う。電界が大きくなると電子を n 側に、正孔を p 側に移動させる力が増す。電子と正孔が空乏層に入ると、電界からエネルギーを得てキャリアが加速し価電子帯の電子を励起する。この電子が空乏層にある正孔と新たに電子 - 正孔対を作る。電子 - 正孔対は、電界によって与えられたエネルギーによって衝突を繰り返し急速にキャリアが増大していく。その様子がなだれの様であることから、アバランシェ破壊は電子なだれ破壊とも呼ばれる。電離する確率は式 ( 4 3 ) によって表わされることが知られている。

$$= A \cdot \text{EXP} \left\{ - \left( b / E \right)^m \right\} \left[ \text{cm}^{-1} \right] \quad \cdot \cdot ( 4 3 )$$

これをグラフ化したものを図 8 に示す。これから分かるように、電界に強く依存し急激に増加することが分かる。従って、ある電界に達したときアバランシェ破壊が発生する。このモデルに基づき濃度と限界電界の関係を示したのが図 9 である。



⊗ 8 Measured Ionization Coefficient for Avalanche Multiplication Versus Electric Field for Ge, Si, GaAs, and GaP. (Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)



⊗ 9 The critical field for avalanche and Zener breakdown in silicon.



### 2.3.2 ツェナー破壊

p形、n形半導体の不純物濃度が極度に高くなると不純物準位が広がり、不純物準位がp形では価電子帯、n形では伝導帯と重なってしまう。このとき、図10のようにフェルミ準位はp形では価電子帯に、n形では伝導帯に位置する。

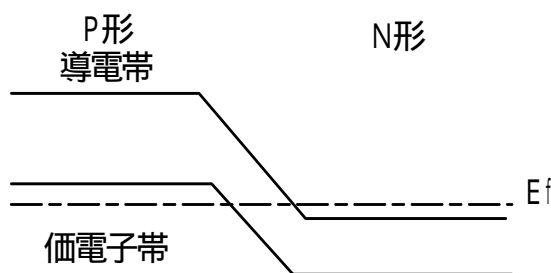


図10 濃度が大きい場合の熱平衡状態における帯構造

従って、 $V_0 = E_g / q$  で与えられる。不純物濃度が極めて大きくなると次式に表わされ、空乏層の厚さは非常に小さくなる。

$$L = L_p + L_n = 2 \sqrt{V_0 / q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \quad \cdot \cdot (44)$$

空乏層の幅が小さい状態では小さな正のバイアス電圧でも図11のように電子が空乏層を抜け電流を流すことができる。これをトンネル効果という。

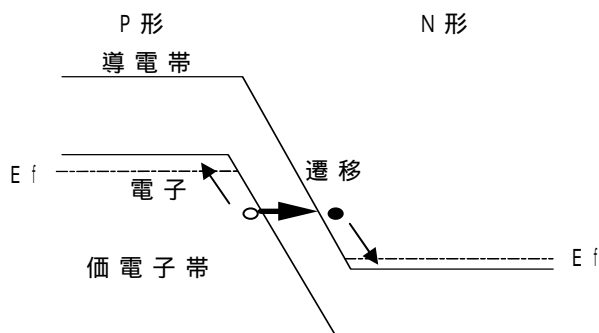


図11 トンネル効果

空乏層の薄いダイオードに逆電圧をかけ電界が高くなると、逆方向のトンネル効果により p 形層の電子が直接 n 形層に量子効果によるトンネル現象により抜けてしまう。この抜けた電子が逆方向電流として測定可能値になった電圧をツェナー破壊電圧と呼ぶ。

### 2.3.3 二次破壊

アクセプタとドナーのどちらかが低濃度のとき、低い方の不純物濃度  $N$  で破壊電界が定まる。このとき、 $N$  の数に対して電子・正孔の数を比較し無視できない場合は、流れている電子・正孔の電荷を考慮する必要がある。この状態は気体中のプラズマの  $V-I$  特性 (図 12) と類似した特性で表わすことができる。気体中のグロー放電と同じように p n 接合では固体中で電流が増加するとき電圧が小さくなる。微分抵抗  $dV/dI$  が負になると負性抵抗が表れる。ダイオードでも p n 接合の耐圧状態で電流を増加させると負性抵抗が気体中のプラズマと同様に固体中で見られる。これは固体プラズマと呼ばれている。

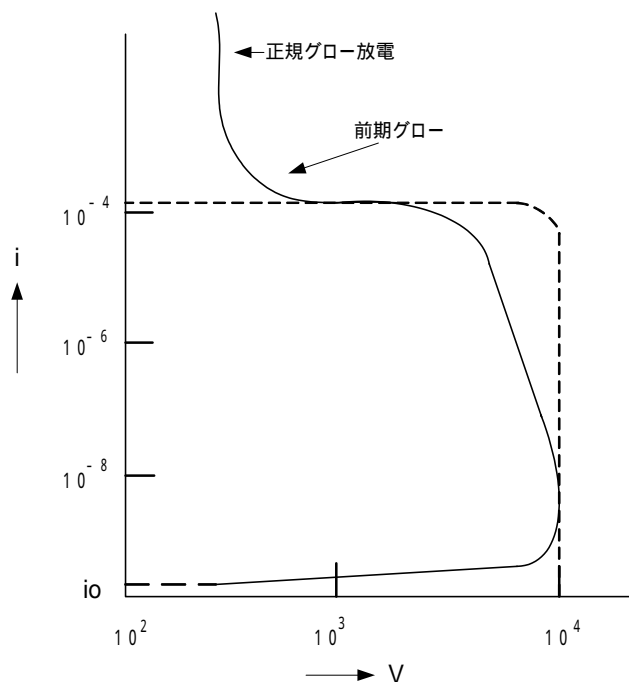


図 12 気体中プラズマの  $V-I$  特性

### 3. 耐圧測定

#### 3.1 自動測定システムの説明

今回の自動測定で回路に印加する電圧は、コンピューターで DC 電源を制御し印加している。測定した電流を電流計で自動計測しその数値をパソコンのディスプレイ上に表示する。また、測定した結果は自動で Excel に書き込まれるようにプログラム作成した。プログラムソフトとして HT - BASIC を使用している。開発したプログラムは付録として示す。回路上の電圧計は DC 電源によって印加された電圧を測定し、精度を確認するために使用している。回路と実際のシステムを図 13 に示す。

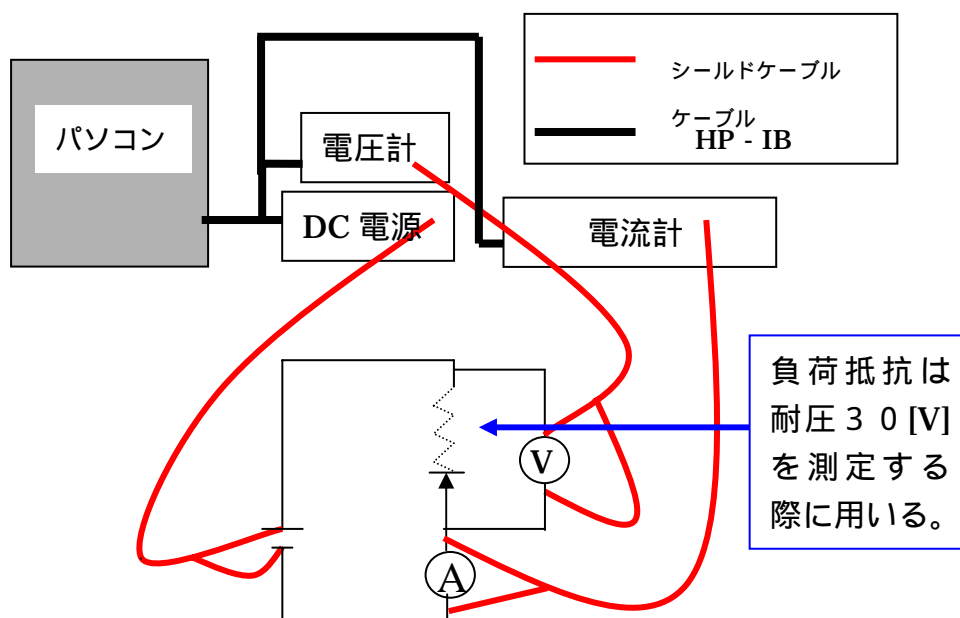


図 13 自動測定システム

## 3.2 測定回路

### 3.2.1 電圧計

この電圧計は回路全体に印加されている電圧を計り、測定結果として表示された印加電圧との誤差を確認するために使用している。使用機種は HEWLETT PACKARD 社の「HP 3478A Multimeter」を用いた。

### 3.2.2 電流計

この電流計はダイオードの逆方向電流を測定している。使用機種は FLUKE 社の「8500A Digital Multimeter」を用いた。

### 3.2.3 DC 電源

この DC 電源は、プログラムによって命令された電圧を回路に印加している。この DC 電源には電流計としての機能も備わっているが、小数点以下 3 桁までしか読み取れないため 3.2.2 の電流計を使用している。使用機種は Agilent Technologies 社の「E3641A DC PowerSupply」を用いた。

## 3.3 測定精度

### 3.3.1 印加電圧の精度

今回の実験では自動測定プログラムによって回路に電圧を印加している。しかし、本当に指示した通りの電圧が印加されているのか保証はない。そこで、回路に掛かっている電圧を独立に測定し、プログラムによってディスプレイに表示された電圧との誤差を明確にした。回路に印加されている電圧とディスプレイに表示されている電圧との誤差は約 0.63% 以下と僅かであり耐圧測定に影響しないことが明らかになった。

### 3.3.2 自動測定システムの精度

3.3.1 から、電圧が正しく印加されディスプレイに表示されていることがわかった。しかし、それだけでは測定システム全体の精度を証明することはできない。そこで、図 14 の回路の V - I 特性を測定した。抵抗は 1 [G ] を使用し 30 [V] まで印加している。

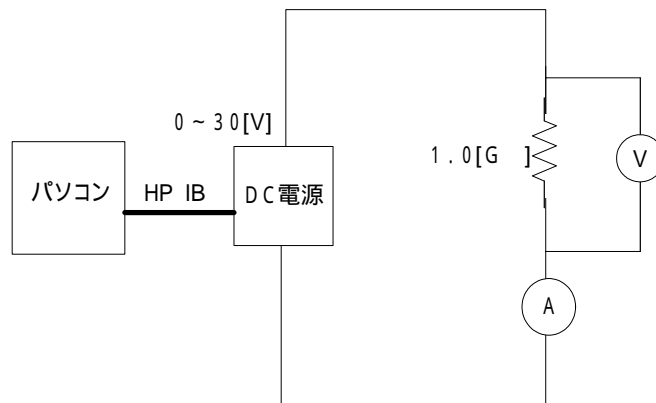


図 14 抵抗 V - I 特性の測定回路

測定結果を図 15 に示す。V - I 特性が直線になり正しく測定できていることがわかる。また、1 [G] の抵抗を使用しているので 30 [V]印加時に電流は 30 [nA]まで流れており、耐圧測定で流れる電流より十分に小さな値が測定できている。また、1 [G] の抵抗を外したときの測定電流は 0.1 [nA]以下であった。測定治具は 0.1 [nA]以上の測定を行うのに十分な絶縁性を有していることがわかった。以上より、今回の実験で測定したい電流値はこの自動測定システムで正しく測定できることを確認した。

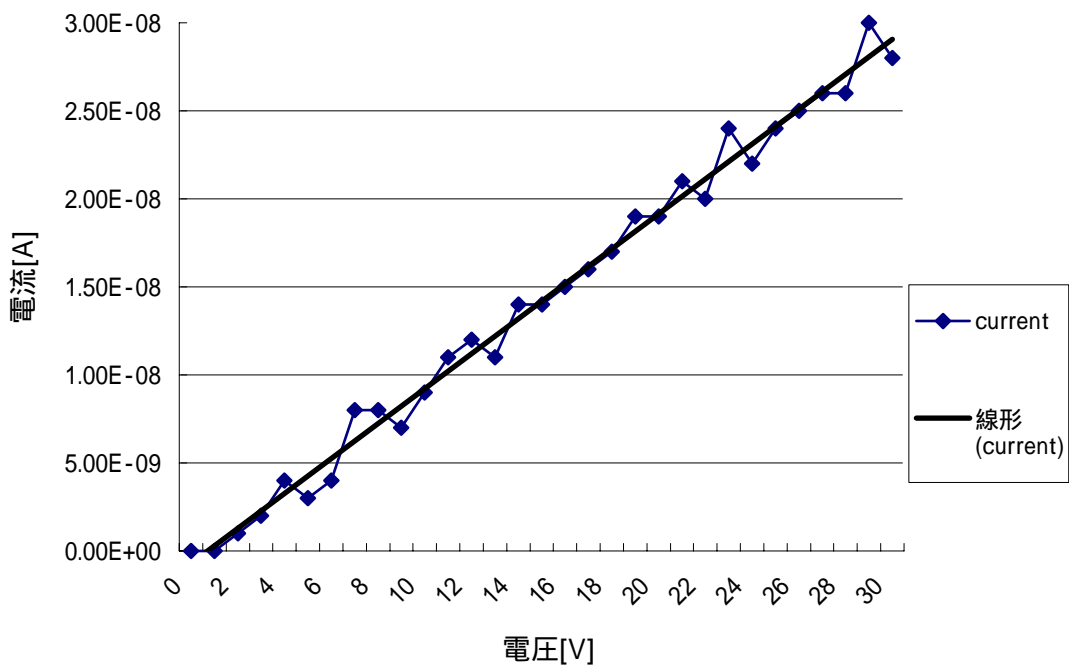


図 15 抵抗 V - I 特性の自動測定結果

## 4 . 測定方法

### 4.1 測定方法の検討

- ) 測定後に DC 電源や電流計が「リモート・インタフェース・モード」になり外部からの操作ができなくなる。こういった状態のときに、リセットをしないまま測定を行うと、測定結果に影響を与えてしまう場合があることがわかった。特に電流計はリセットをしないと図 16 のように測定値が大きく変化してしまうことが測定プログラムのノウハウとして分かった。

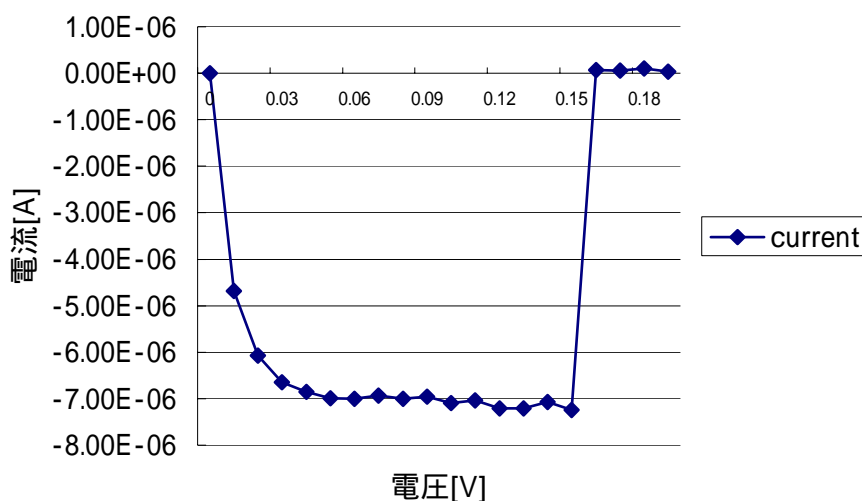


図 16 耐圧 6.2 [V] 0.0 1 STEP 5 回測定 測定装置のリセットなし

- ) 電圧の印加ステップを広げ過ぎると、図 17 のようにコンデンサーの充放電電流が流れ測定値が大きく変化する。測定時はその点に注意し印加ステップ幅の最大値を求め、安全を考えてその値より一段小さなステップを用いた。0.0 1 ステップで測定すると全ての試料で正しい測定をすることができた。 ) の直接の原因もコンデンサーの充放電電流である。

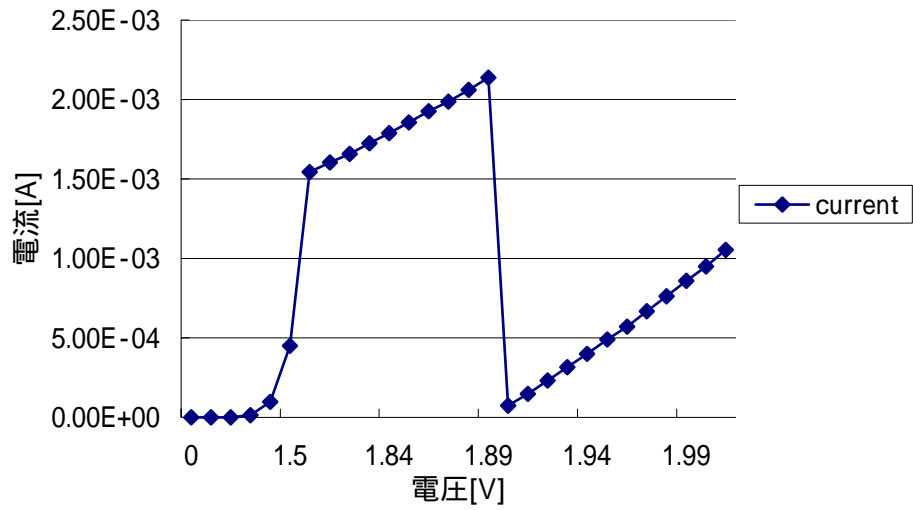


図 17 耐圧 2.4 [V] 5 回測定 コンデンサーの充放電電流による特性の乱れ  
 0 ~ 1.8 [V]は 0.3 STEP 1.8 1 ~ 2.7 [V]は 0.0 1 STEP

- ) 測定値の精度を上げるために同一試料で 5 回測定し、5 回目の測定値を出力するようにプログラムした。
- ) 測定回路のリーク電流を少なくするため、図 18 のようにシールドケーブルを使用した。

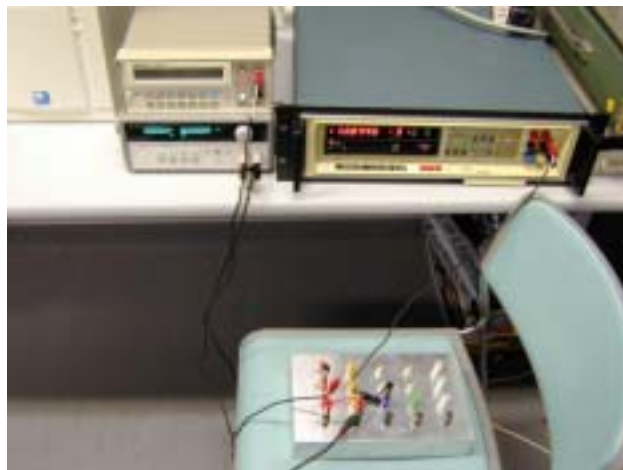


図 18 シールドケーブルを用いた測定装置

## 4.2 ダイオード別測定方法

### 4.2.1 耐圧 2.4 [V]

このダイオードは 2.4 [V] 辺りが耐圧であることが「CURVE TRACER」を用いて確認されている。実際に DC 電源で回路に電圧を印加しても 2.4 [V] 辺りで急激に電流が増加することを電流計で見てとれた。このことより、0 ~ 2.7 [V] まで電圧を印加し V - I 特性を測定した。電圧の印加間隔は 0.01 STEP とし、5 回測定の 5 回目を出力している。自動測定回路を図 19 に示す。

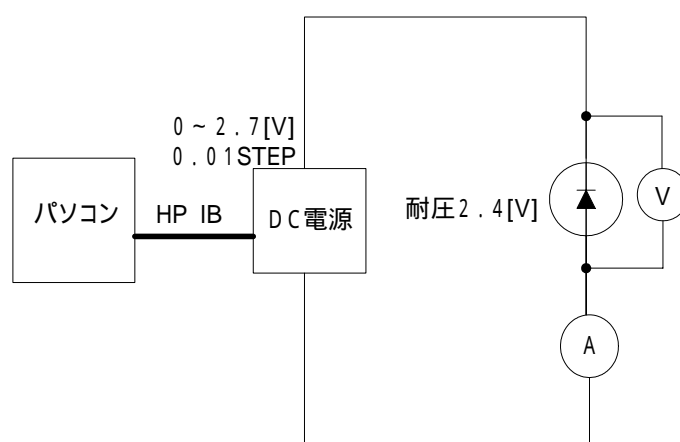


図 19 耐圧 2.4 [V] ダイオードの自動測定回路

### 4.2.2 耐圧 6.2 [V]

このダイオードの耐圧は 6.2 [V] 辺りであることを「CURVE TRACER」と、回路に電圧を印加し電流計で読み取り確認した。印加電圧は 0 ~ 6.35 [V] で V - I 特性を測定した。電圧の印加間隔は 0 ~ 6.35 [V] を 0.01 STEP としている。4.2.1 と同じく測定回数は 5 回で、5 回目を測定結果として出力するようにプログラムした。自動測定回路を図 20 に示す。



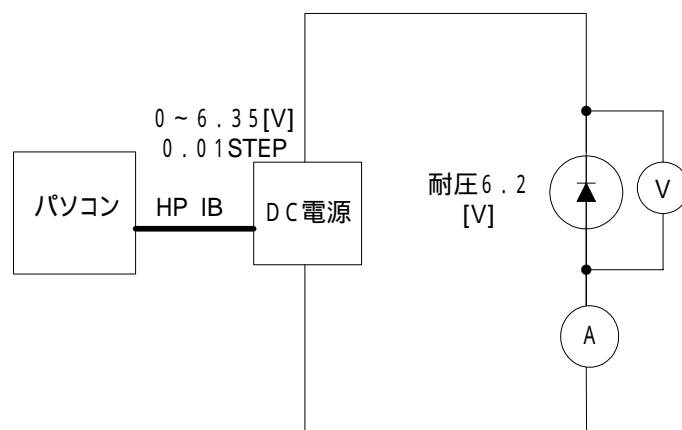


図 20 耐压6.2ダイオードの自動測定回路

#### 4.2.3 耐压30[V]

このダイオードも同じく「CURVE TRACER」と、回路に電圧を印加したときの電流の変化を読み取り耐压が30[V]辺りであることを確認した。印加電圧は27～35[V]で、印加間隔は0.01STEPである。このダイオードでは二次破壊の負性抵抗を打ち消し安定に測定できるように回路に抵抗を入れている。抵抗値は「CURVE TRACER」の抵抗値を変化させ、安定に二次破壊の見られる抵抗値及び電流値を測定した。しかし、実際にはそのままの値の抵抗を使うと上手く負性抵抗を測定できなかった。そこで少しずつ抵抗値を小さくし電流を増加させ、測定できる抵抗値を見つけた。その抵抗値が3.9[K]である。

自動測定回路を図21に示す。測定回数は4.2.1、4.2.2と同じく、5回測定の5回目を測定結果として出力している。

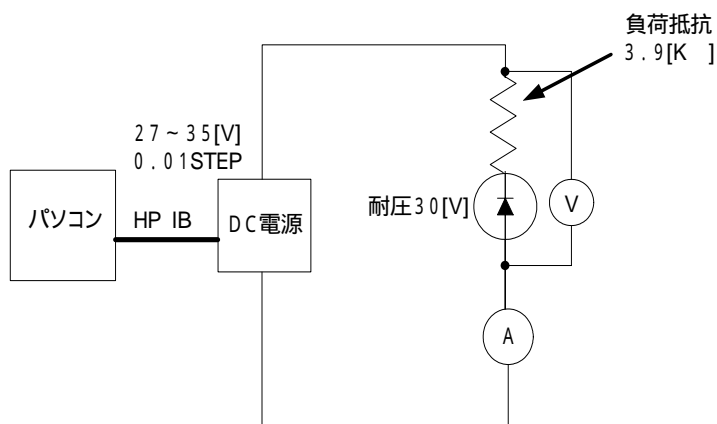


図 21 耐压30[V]ダイオードの自動測定回路

## 5 . 測定及び考察

### 5.1 ダイオード別測定及び考察

#### 5.1.1 耐圧 2.4 [V]

このダイオードは濃度が濃いので、式(44)から空乏層幅が狭くなることわかる。この結果、トンネル効果により電子が導電帯に抜け緩やかな立ち上がり(ソフトブレイクダウン)が図22に示すように見られる。電圧が高くなると電界が強くなり価電子帯から導電帯へのトンネル幅が狭くなるので多く電子が導電帯に抜ける。それに比例し電流も増加する。

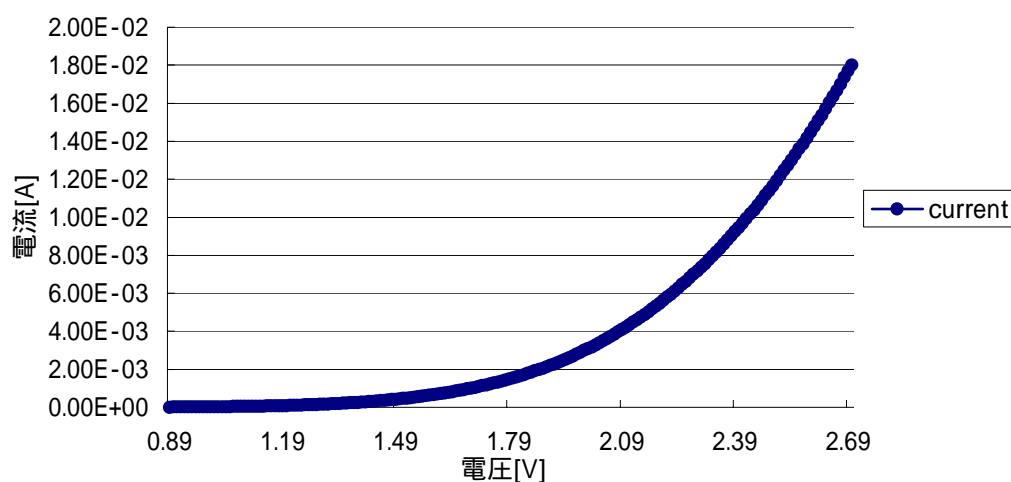


図 22 耐圧 2.4 [V]ダイオードの V I 特性

以前から 10 [ $\mu$ A]の電流が流れる電圧のことを耐圧と呼んでいたが、定電圧を得るダイオードの定格電流は 10 [mA]流れる電圧を耐圧と呼んでいる。ダイオードに記されている耐圧は後者の方である。低電圧源として活用するには 1 [mA]と 10 [mA]流れるときの電圧差で比較するのが実用的である。それぞれ 1.69 [V]と 2.42 [V]の電圧が印加されている。二つの電圧には 0.73 [V]の差があり図 22 からわかるように定電圧源として適していないと言える。

2.42 [V]を耐圧とすると図 23 よりこの耐圧での容量  $C_B$  は  $10^{18}$  [ $\text{cm}^{-3}$ ]以上である。図 9 よりこの容量のときダイオードはツェナ - 破壊が先に起こることが分かる。

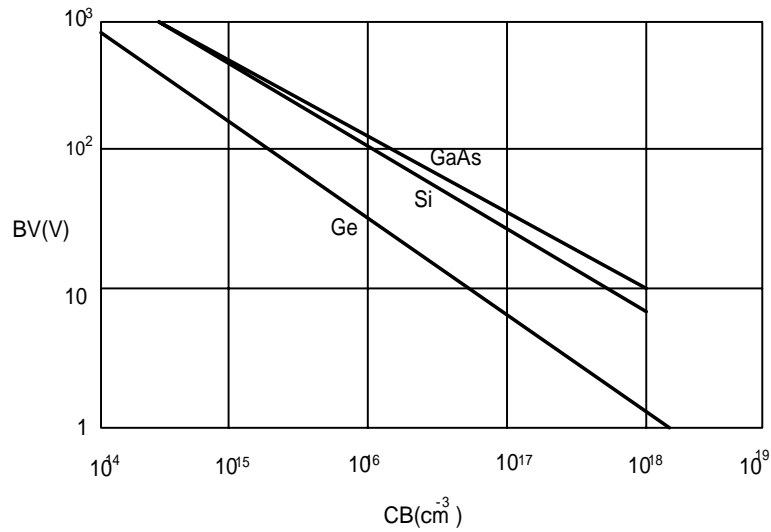


図 23 Breakdown voltage of one-side step-junctions. Points represent direct experimental measurements in silicon, lines were calculated based on ionization rates.

### 5.1.2 耐圧 6.2 [V]

図 24 に見られるようにこのダイオードは 5.1.1 に比べ鋭い立ち上がり(ハードブレイクダウン)で電流が増加している。これは 2.3.1 で述べたように、電子が価電子帯から導電帯に励起し電流がなだれのように流れる現象で耐圧時の電流特性を説明できる。

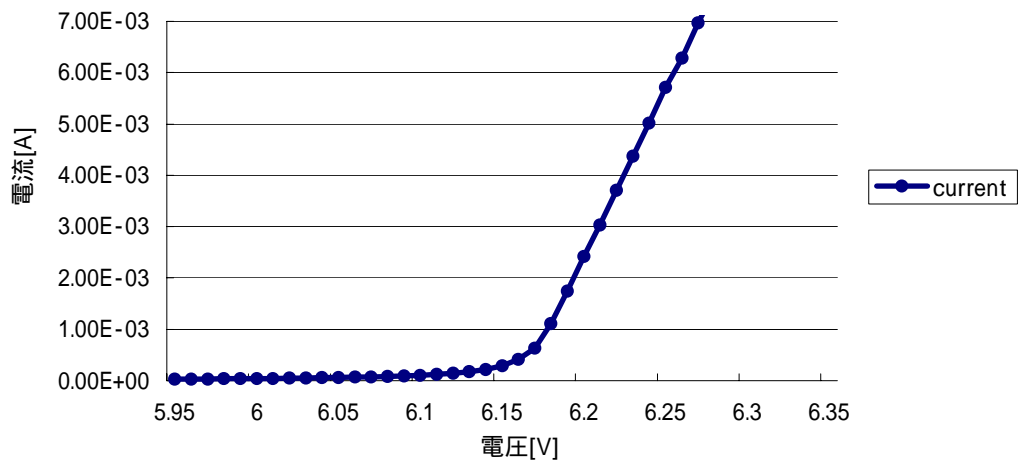


図 24 耐圧 6.2 [V]ダイオードの V I 特性

5.1.1 と同じくこのダイオードの定電圧性を確かめるために 1 [mA]と 10 [mA]の電流が流れる電圧を比較する。それぞれ 6.18 [V]と 6.32 [V]であり、0.14 [V]の差がある。5.1.1 と比較すると定電圧源として優れていることが分かる。

$E_{max}$  を次の式より求める。

$$E_{max} = (q / \epsilon) N \cdot W$$

式 (42) を次のように変形し  $E_{max}$  を代入する。

$$BV = (1 / 2) E_{max} \cdot W$$

これを解くと約 6.2 [V]の値がでる。ここで使用する濃度  $N$  は昨年「PN 接合の Lifetime 評価」で研究をされた山根 優氏の研究データを使用している。

5.1.1 と同じように図 23 に耐圧を入れてみると、容量  $C_B$  は  $10^{18} [cm^{-3}]$  より小さい値であることが分かる。図 9 よりこの  $C_B$  ではアバランシェ破壊の領域であることが分かる。

以上より、先にアバランシェ破壊を起こすダイオードは先にツェナ - 破壊を起こすダイオードより定電圧源として優れた性能をみせることが分かった。

濃度が濃くなると  $E_{max}$  が増加する。エネルギーを電界から得て移動する p n 接合での電子のエネルギーは散乱されるまでの距離がほぼ一定と見なされている。この距離を平均自由行程と言う。濃度が濃くなり空乏層が狭くなると  $E_{max}$  が大きくなり電離に必要なエネルギーをほぼ一定に保っている。その様子を図 25 に示す。

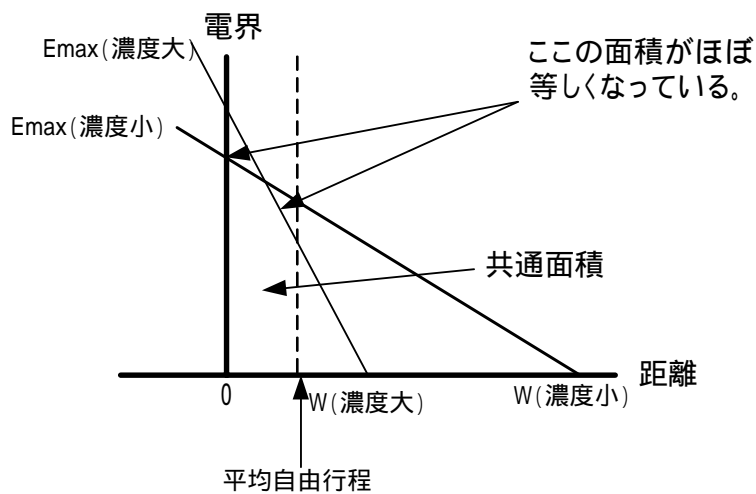


図 25 濃度と  $E_{max}$  の関係

アバランシェ破壊を引き起こす  $E_{max}$  は濃度が濃くなると増加する。この  $E_{max}$  がトンネル効果が表れる電界を越えると、破壊はツェナ - 破壊へと移って行く。2.4 [V]耐圧のダイオードでは不純物濃度からツェナ - 領域、6.2 [V]耐圧のダイオードではアバランシェ領域であることが推定される。図 22、図 24 の耐圧特性から推測が正しいことを確認できた。

また、図 24 の測定値はダイオードの抵抗が影響して、若干緩やかになっている。この抵抗を計算で求めると約 1.3 [ ]である。この誤差を取り除くと鋭い立上りの測定値になる。

### 5.1.3 耐圧 30 [V]

このダイオードでは二次破壊電圧の測定を主に行った。二次破壊とは抵抗を付加したダイオードが、一次破壊後に更に電圧を印加すると、ダイオードに印加されている電圧が減少するが電流は増加し負性抵抗が見られる現象である。図 26 のように破壊電圧以上の電圧を加えるとダイオードに加わる電圧が減少している。これは固体中でも気体中のプラズマと同じ現象が発生していることになる。

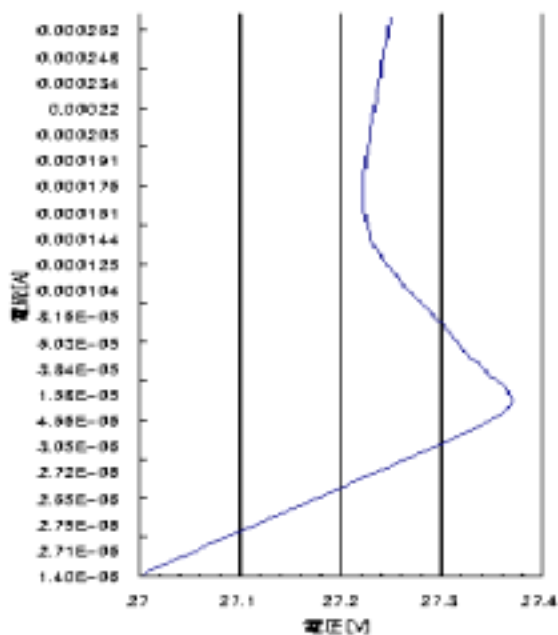


図 26 耐圧 30 [V]ダイオードの V - I 特性

回路中の負荷抵抗はこれ以上小さくなると図 27a のように線が飛んでしまい二次破壊の V - I 特性を安定に計れなくなる。また、大電流が流れダイオードを破壊してしまう。逆に抵抗を大きくし過ぎると回路印加電圧が高くなり、高電圧の電源を必要とする。

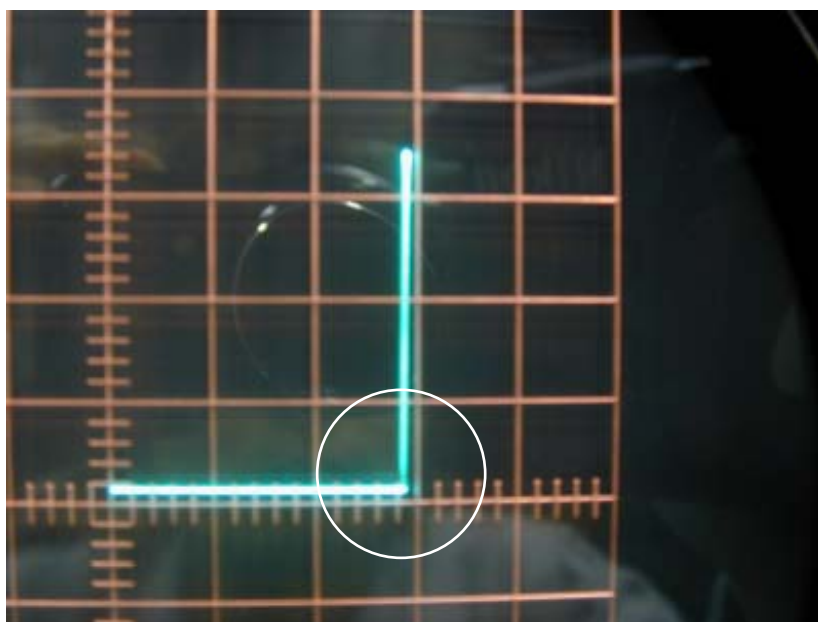


図 27a 誤った負荷抵抗での耐圧 30 [V]ダイオードの V - I 特性  
 ( 電流が急激に流れ始める所の輝線が薄くなっている。これは  
 その地点での濃度が薄いためである )

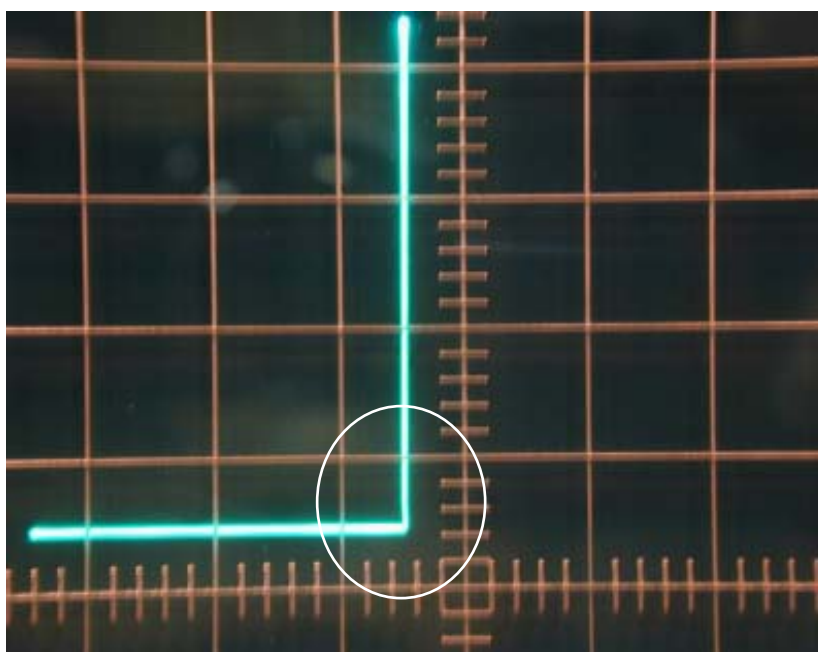


図 27b 正しい負荷抵抗での耐圧 30 [V]ダイオードの V - I 特性  
 ( 電流が急激に流れ始める電圧で二次破壊が確認できる )

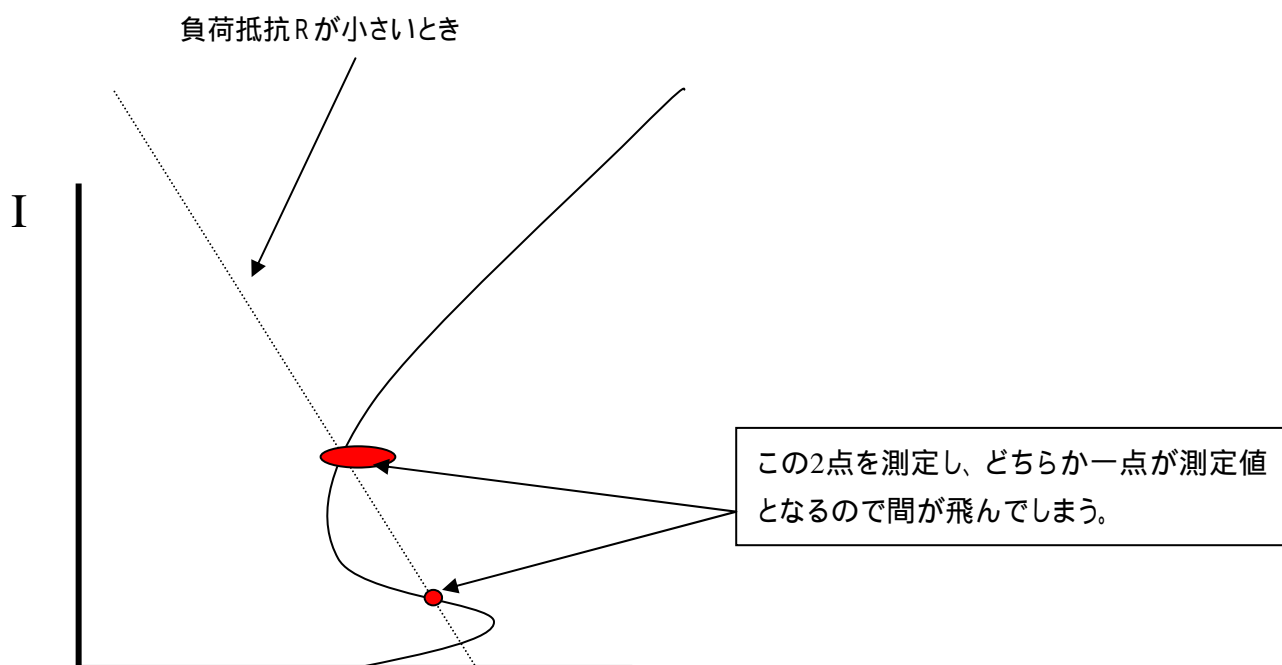


図 28 「CURVE TRACER」の輝線が飛んでしまう原因

5.1.1、5.1.2 のダイオードは  $10 [\mu\text{A}]$  と  $10 [\text{mA}]$  の電圧を比較したがいずれもダイオードの電力の最大定格  $100 [\text{mW}]$  の数値内だった。しかし、耐圧  $30 [\text{V}]$  のダイオードに  $10 [\text{mA}]$  の電流を流すと、約  $300 [\text{mW}]$  になり最大定格を大きく上まってしまふ。だが、ダイオードに印加されている電圧は電源の印加電圧が上がってもほとんど変化しないので、このダイオードの定電圧性が優れていると言える。

負性抵抗特性を安定に測定できる負荷抵抗を「CURVE TRACER」で確認し、 $3.9 [\text{K}]$  を用いた。この値の抵抗を用いると DC 精密測定でも安定に測定できた。

## 6 . おわりに

自動測定プログラムを作りツェナ - ダイオードを測定すると、濃度ごとの特性の違いが分かった。ツェナ - 破壊、アバランシェ破壊、二次破壊とグラフからも分かるように三者三様の特徴があるので用途に応じて選択しなければならない。今回測定したデータは一つの目安として活用できると思われる。また、難しいと言われる負性抵抗の測定に成功しその方法を確立することができた。

全体的に感じたことは、マニュアル通りにプログラム作成や計測を行っても上手く行くことが少なということである。失敗を繰り返し経験を積むことで分かることが多くの部分を占めている。卒業研究として完成したのも、まだ改良の余地が十分にあり、精度を高めていくことができるはずである。



## 7. 謝辞

私に卒業研究を行うきっかけを与えて下さり、卒業論文作成を通じて様々な面で大切なことを教えて下さった、高知工科大学工学部電子・光システム工学科の河津 哲教授には筆舌に尽くしがたいほど感謝しております。私がここまで研究を進めることができたのは全て先生の御蔭です。本当に、ありがとう御座いました。

また、卒業研究室（A255）で共に苦勞を分かち合った同期のみなさんと、同じ研究室の大橋 健二さん、中上 大輔さんに感謝します。研究に臨まれている姿から励まされ勇気付けられ、研究の合間の雑談で元気付けられました。同じ時間を過ごせたことを心から嬉しく思っています。ありがとう御座いました。

参考文献 (敬称略)

応用物理 Vol36	応用物理学会		( 1 9 6 7 )
半導体工学	東京電機大学出版社	深海 登世司	( 1 9 8 7 )
半導体工学の基礎	コロナ社	清水 潤治	( 1 9 8 6 )
半導体デバイス	コロナ社	電子情報通信学会	( 1 9 8 2 )
半導体とトランジスタ ( 2 )	オーム社	渡辺 寧	( 1 9 5 9 )
プラズマ工学の基礎	オーム社	A. von Engel	( 1 9 8 5 )

付録

1 . 抵抗の V I 特性自動測定プログラム

```
CREATE "V-I-G.csv",1
ASSIGN @Excel01 TO "V-I-G.csv";FORMAT ON

DIM V(1000),A1(1000),A2(1000),R(1000)

ASSIGN @E3641 TO 705
ASSIGN @E3478 TO 709
ASSIGN @E8500 TO 706

CLEAR 7

OUTPUT @E3641;"*rst;*cls;*opc"
OUTPUT @E3478;"F1R1"
OUTPUT @E8500;"IR0S0T?"

PRINT "C=","V=","A1=","A2=","R="

OUTPUT @Excel01;"count,voltage,current1,current2,resistance"
OUTPUT @E3641;"OUTP ON"

N=31

FOR C=1 TO N
V(C)=1*(C-1)
OUTPUT @E3641;"APPL ";V(C);",0.005"
WAIT 1.5
ENTER @E8500;A1(C)
WAIT 1.5
ENTER @E8500;A2(C)
IF A1(C)>.005 THEN GOTO 218
```

```
R(C)=V(C)/A2(C)
PRINT C,V(C),A1(C),A2(C),R(C)
OUTPUT @Excel01;C,V(C),A1(C),A2(C),R(C)
NEXT C
```

```
OUTPUT @E3641;"appl 0.0,0.0"
```

```
END
```

## 2 . 耐圧 2.4 [V]ダイオードの V I 特性自動測定プログラム

N=271

O=.01

Q=5

CREATE "BV V-I2.4V5time.csv",1

ASSIGN @Excel01 TO "BV V-I2.4V5time.csv";FORMAT ON

DIM V(1000,10),A1(1000,10),A2(1000,10)

ASSIGN @E3478 TO 709

ASSIGN @E3641 TO 705

ASSIGN @E8500 TO 706

CLEAR 7

OUTPUT @E3478;"F1R1"

OUTPUT @E3641;"\*rst;\*cls;\*opc"

OUTPUT @E8500;"IR2S0T?"

PRINT "C=","V=","A1=","A2="

OUTPUT @Excel01;"count,voltage,current1,current2"

OUTPUT @E3641;"OUTP ON"

FOR I=1 TO N

FOR D=1 TO Q

V(I)=O\*(I-1)

OUTPUT @E3641;"APPL ";V(I);",0.023"

WAIT .1

ENTER @E8500;A1(I,D)

IF A1(I,D)>.021 THEN GOTO 310

NEXT D

$A2(I) = A1(I, Q) - A1(1, Q)$

$A1(I) = A1(I, Q)$

PRINT I, V(I), A1(I), A2(I)

OUTPUT @Excel01; I, V(I), A1(I), A2(I)

NEXT I

OUTPUT @E3641; "APPL 0.0,0.0"

END

### 3 . 耐圧 6.2 [V]ダイオードの V I 特性自動測定プログラム

=636

O=.01

Q=5

CREATE "BV V-I6.2V5time.csv",1

ASSIGN @Excel01 TO "BV V-I6.2V5time.csv";FORMAT ON

DIM V(1000,10),A1(1000,10),A2(1000,10)

ASSIGN @E3478 TO 709

ASSIGN @E3641 TO 705

ASSIGN @E8500 TO 706

CLEAR 7

OUTPUT @E3478;"F1R1"

OUTPUT @E3641;"\*rst;\*cls;\*opc"

OUTPUT @E8500;"IR2S0T?"

PRINT "C=","V=","A1=","A2="

OUTPUT @Excel01;"count,voltage,current1,current2"

OUTPUT @E3641;"OUTP ON"

FOR I=1 TO N

FOR D=1 TO Q

V(I)=O\*(I-1)

OUTPUT @E3641;"APPL ";V(I);",0.014"

WAIT .1

ENTER @E8500;A1(I,D)

IF A1(I,D)>.013 THEN GOTO 310

NEXT D

$A2(I) = A1(I, Q) - A1(1, Q)$

$A1(I) = A1(I, Q)$

PRINT I, V(I), A1(I), A2(I)

OUTPUT @Excel01; I, V(I), A1(I), A2(I)

NEXT I

OUTPUT @E3641; "APPL 0.0, 0.0"

END



#### 4 . 耐圧30[V]ダイオードのV-I特性自動測定プログラム

N=801

O=.01

Q=5

CREATE "BV V-I30V.5time.csv",1

ASSIGN @Excel01 TO "BV V-I30V.5time.csv";FORMAT ON

DIM V(1000,10),A1(1000,10),Vd(1000,10),Vt(1000,10)

ASSIGN @E3478 TO 709

ASSIGN @E3641 TO 705

ASSIGN @E8500 TO 706

CLEAR 7

OUTPUT @E3478;"F1R2T1"

OUTPUT @E3641;"\*cls;\*opc"

OUTPUT @E8500;"IR2S0T?"

PRINT "C=","V=","Vd=","Vt=","A1="

OUTPUT @Excel01;"count,voltage,voltageD,voltageT,current1"

OUTPUT @E3641;"OUTP ON"

FOR I=N TO M

FOR D=1 TO Q

V(I)=O\*(I-1)+27

OUTPUT @E3641;"APPL ";V(I);",0.0025"

WAIT .1

ENTER @E8500;A1(I,D)

```
IF A1(I,D)>.0025 THEN GOTO 310  
NEXT D
```

```
ENTER @E3478;Vt(I)  
A1(I)=A1(I,Q)  
Vd(I)=V(I)-A1(I)*3900  
PRINT I,V(I),Vd(I),Vt(I),A1(I)  
OUTPUT @Excel01;I,V(I),Vd(I),Vt(I),A1(I)  
NEXT I
```

```
OUTPUT @E3641;"APPL 0.0,0.0"
```

```
END
```