

Report on the Experiment

No. 6

Subject ダイオードの実験

Date 2019. 04. 15

Weather 晴れ Temp 17.3 °C Wet 51 %

Class E3
Group 6
Chief
Partner 大橋 りさ
二重谷 光輝
森 和也
DANDAR TUGULDUR

No 15
Name 小畠 一泰

Kure National College of Technology

1 目的

ダイオードの特性実験や定電圧回路、整流回路実験を行うことで、ダイオードの使い方を理解することを目的とする。

2 理論

2.1 ダイオード

ダイオード (diode) は 図. 1 のように、p 形と n 形半導体との接合によって構成され、(a) の順バイアス状態では、正孔は - に、電子は + にそれぞれ引かれ、両キャリアが接合面を通過して流入し電流が流れる。(b) の逆バイアス状態では、両キャリアは電極に引き寄せられ、電流が流れにくいことが分かる。このように順バイアスのときだけ電流が流れる特性を整流特性という。逆飽和電流を I_S とすると順電流は、

$$I_F = I_S(e^{qV/kT} - 1) \quad (1)$$

で与えられ、順電圧 V が大きい領域では $e^{qV/kT} \gg 1$ であるから、 $I_F \approx I_S e^{qV/kT}$ となって指数関数的に増加する。一方逆電流は、逆電圧 V が大きい領域では $e^{qV/kT} \ll 1$ であるから $I_R \approx -I_S$ となる。

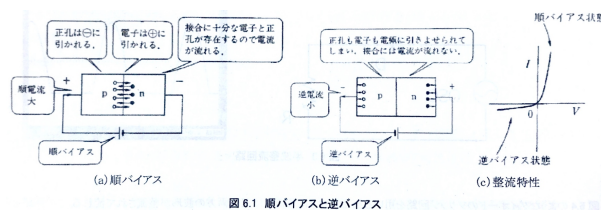


図.1: 順バイアスと逆バイアス

2.2 逆電圧降伏とツェナー・ダイオード

逆電圧を増加していくと、ある限界電圧異常では電流が急激に増大する。この現象を逆電圧降伏 (reverse voltage breakdown) という。降伏機構には電子なだれ (avalanche

breakdown) とツェナー降伏 (Zener breakdown) がある. 電子なだれは, 電子が強電界で加速され, 原子と衝突して新たな電子を発生する過程が累加的に繰り返されて起こる. ツェナー降伏は, 接合面の電界が強くなるとトンネル効果が起こり逆電圧降伏を起こす. ツェナー降伏を積極的に利用した阻止をツェナー・ダイオード (Zener Diode: ZD) という.

2.3 ツェナー・ダイオードによる定電圧回路

図. 2 の回路で負荷抵抗 R_L が無限大で, 負荷電流 I_L は流れないとする. ZD の両端の電圧 V_Z は逆電流が流れていれば一定であり, 電源電圧 V_i と抵抗 R_1 の両端の電圧 V_{R1} との関係は $V_i = V_{R1} + V_Z$ である. したがって抵抗 R_1 には,

$$I_{R1} = \frac{(V_i - V_Z)}{R_1} \quad (2)$$

の電流が流れる. V_i 一定のまま負荷抵抗 R_L を減少させ負荷電流 I_L を流しても, ZD に逆電流が流れていれば V_Z 一定であるから, I_{R1} は負荷に関係なく一定値になり最大出力電流を流している. ZD の電流は,

$$I_Z = I_{R1} - I_L \quad (3)$$

となって, I_L を取り出しても, I_Z が流れていれば V_Z は降伏電圧を保ち続ける.

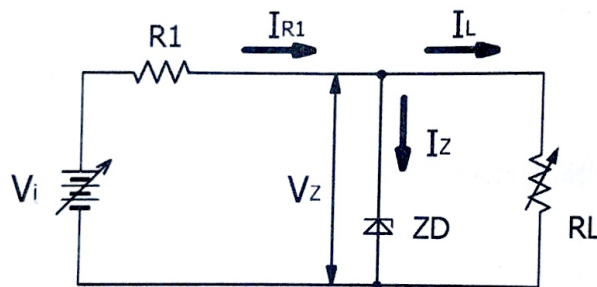


図.2: 定電圧回路の実験回路

2.4 少数キャリアの蓄積効果

pn 接合電圧が順方向から逆方向に反転した場合図. 3 のように成正孔が残留し, これが流れ去るには一定の時間を要し, その間逆方向に電圧が流れる. どれだけの時間逆方向に電

流が流れるのかを表すのに逆回復時間 (Reverse Recovery Time: T_{rr}) が用いられる。 T_{rr} は小さい方が高周波で使用可能である。 整流用のダイオードには、一般整流用、高速整流ダイオード (Fast Recovery Diode: FRD)、ショットキー・バリア・ダイオード (Schottky Barrier Diode: SBD) があり、高周波で高い逆電圧には FRD、高周波で低い逆電圧の場合は SBD を用いる。 SBD は pn 接合ではなく、金属と半導体のショットキー接合である。

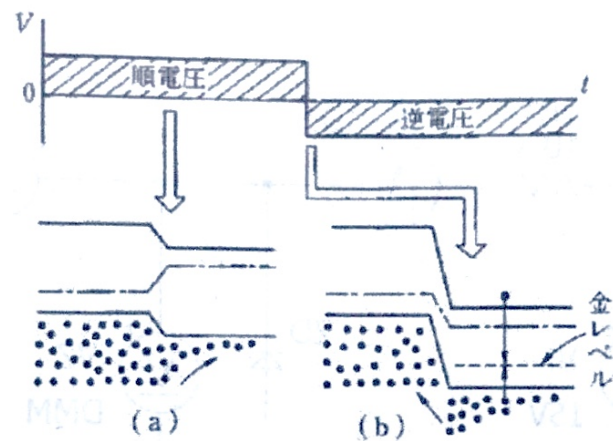


図.3: 少数キャリアの蓄積効果

3 実験方法と結果の整理

3.1 使用器具

1. デジタルオシロスコープ (RIGOL DS1064B) (SERIAL NO. DS1BE121000022)
2. OSC: 発振器 (nF1915) (SERIAL NO. 4287571)
3. E: 直流電源 (KENWOOD PR18-3A)
4. 実験キット
5. DMM: デジタルマルチメーター (Agilent PC720M)
6. V: 直流電圧系 15/30V ($1000\Omega/V$) (管理番号 20)
7. A: 直流電流系 10/30/100/300mA 2 台 (管理番号 34, 35)
8. スライド抵抗器 (4800Ω) (No. N7033R118)
9. スライド抵抗器 (330Ω) (No. Y-149)
10. SW: スイッチ
11. 各種試供ダイオード (ダイオード: 1N4007, ツェナー・ダイオード: 1N5338B)

3.2 ダイオードの順方向特性

一般整流用ダイオードについて, 図. 4 の回路で, 電圧を 0 として, SW を投入した. 少しずつ電圧を上昇し, 順電流の値を測定した. 電流は 100mA まで計測し, 表. 1 に計測結果を, 図. 5 に順バイアス特性のグラフを示す. 供試ダイオードとして 1N4007 を用いた.

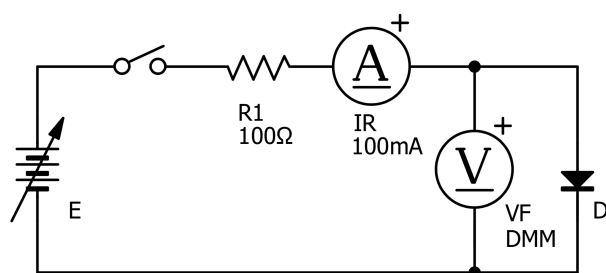


図.4: 順電流測定回路

表.1: ダイオードの順電流の測定

$V_F(\text{V})$	$I_F(\text{mA})$
0.000	0.00
0.106	0.00
0.208	0.00
0.300	0.00
0.404	0.00
0.425	0.01
0.450	0.05
0.499	0.30
0.603	1.60
0.700	12.00
0.750	35.10
0.800	96.50

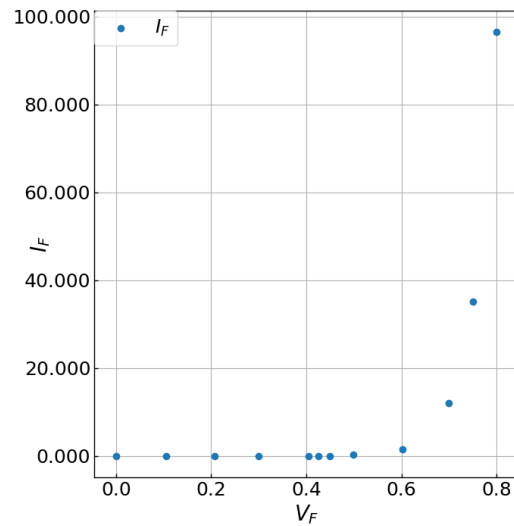


図.5: 順バイアス特性

3.3 ツェナー・ダイオードの逆降伏電圧

ZD について, 図. 6 の回路で, 印加電圧を 0 より徐々に増加し, 逆電流の値を測定した. 電流は 50mA まで測定し, 表. 2 に計測結果を, 図. 7 に逆バイアス特製のグラフを示す. 供試ツェナー・ダイオードとして 1N5338B を用いた.

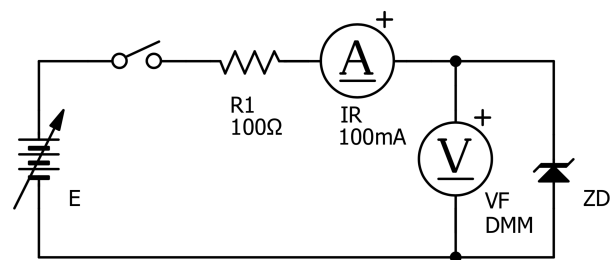


図.6: 逆降伏電圧測定回路

表.2: ツェナー・ダイオードの逆降伏電圧の測定

$V_R(\text{V})$	$I_R(\text{mA})$	$R_Z = \Delta V_R / \Delta I_R (\Omega)$
4.861	100.00	0.049
4.843	80.00	0.061
4.814	60.00	0.080
4.765	40.00	0.119
4.652	20.00	0.233
4.501	10.00	0.450
4.332	5.00	0.866
4.202	3.10	1.355
4.001	2.50	1.600
3.973	1.50	2.649
3.502	0.10	35.020
3.004	0.00	0.000
1.501	0.00	0.000
0.000	0.00	0.000

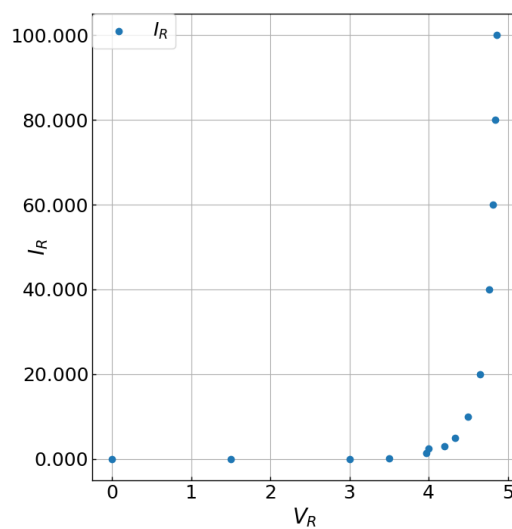


図.7: 逆バイアス特性

3.4 定電圧回路

図. 8 の回路を組む.

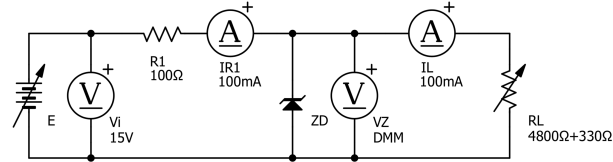


図.8: 定電圧回路の実験回路

3.4.1 負荷変化

R_L を最大にして, 電源電圧を上書き, I_{R1} を 40mA に設定した. 電源電圧をそのまま一定にしておき, R_L を減少し, I_L を 4mA 増すごとに V_Z, I_{R1} を読んだ. V_Z が元の電圧の 70 % になったらやめた. 表. 3 に計測結果を, 図. 9 に負荷変化の場合のグラフを示す. 供試ツェナー・ダイオードとして 1N5338B を用いた. また $V_i = 8.61(V)$ とする.

表.3: 定電圧回路負荷変化

$I_L(\text{mA})$	$I_{R1}(\text{mA})$	$I_Z(\text{mA})$	$V_Z(\text{V})$	$R_L(\Omega)$
4.0	40.0	36.00	4.749	0.132
8.0	40.0	32.00	4.732	0.148
12.0	40.1	28.10	4.713	0.168
16.0	40.3	24.30	4.689	0.193
20.0	40.9	20.90	4.659	0.223
24.0	41.0	17.00	4.620	0.272
28.0	41.5	13.50	4.570	0.339
32.0	42.1	10.10	4.504	0.446
36.0	43.0	7.00	4.416	0.631
40.1	44.5	4.40	4.274	0.971
43.9	46.7	2.80	4.106	1.466
48.0	49.0	1.00	3.824	3.824

$I_L(\text{mA})$	$I_{R1}(\text{mA})$	$I_Z(\text{mA})$	$V_Z(\text{V})$	$R_L\Omega$
51.9	52.1	0.20	3.525	17.625
55.7	55.9	0.20	3.194	15.970
60.1	60.1	0.00	2.746	0.000
63.7	64.0	0.30	2.408	8.027
67.8	68.0	0.20	2.022	10.110
72.0	72.0	0.00	1.620	0.000
75.9	76.0	0.10	1.240	12.400
79.8	80.0	0.20	0.872	4.360
83.9	84.0	0.10	0.478	4.780
88.0	88.0	0.00	0.076	0.000

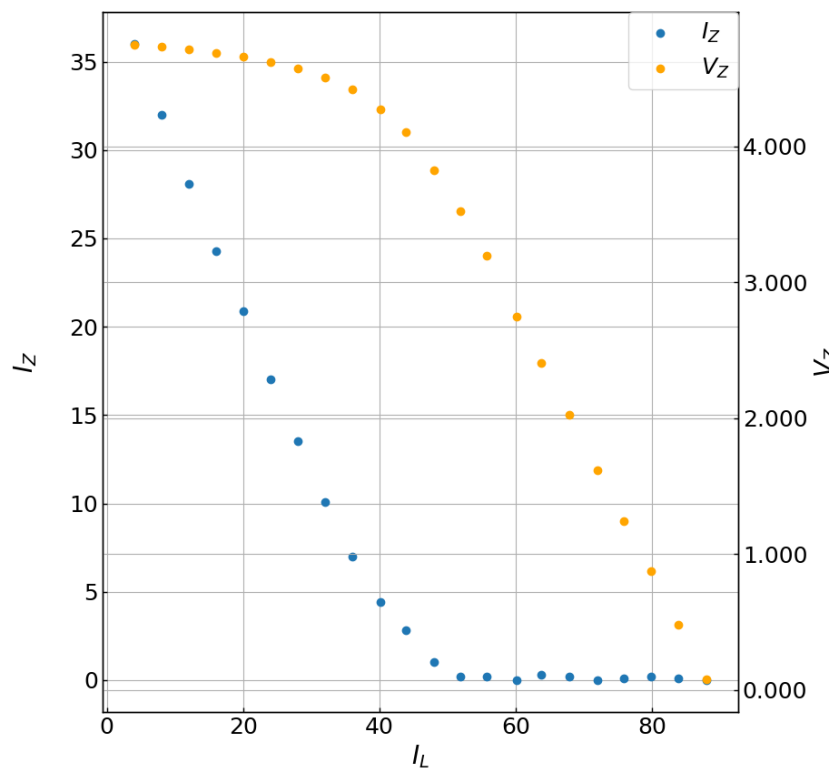


図.9: 負荷抵抗の場合グラフ

3.4.2 電源電圧変化

$R_L = 300\Omega$ 付近で一定にしておき, V_i を 4.5V から 11.5V まで, 0.5V おきに変えて, その時の V_Z, I_{R1}, I_L を読んだ. 表. 4 に計測結果を, 図. 10 に電源電圧変化の場合のグラフを示す. 供試ツェナー・ダイオードとして 1N5338B を用いた.

表.4: 定電圧回路電源電圧変化

$V_i(\text{V})$	$I_{R1}(\text{mA})$	$I_L(\text{mA})$	$I_Z(\text{mA})$	$V_Z(\text{V})$
4.5	11.1	11.10	0.000	3.403
5.0	13.0	12.30	0.700	3.758
5.5	15.1	13.10	2.000	4.036
6.0	17.9	14.00	3.900	4.257
6.5	21.1	14.60	6.500	4.412
7.0	25.1	15.00	10.100	4.519
7.5	30.0	15.00	15.000	4.592
8.0	34.1	15.10	19.000	4.644
8.5	39.0	15.20	23.800	4.685
9.0	43.5	15.50	28.000	4.713
9.5	48.5	15.60	32.900	4.738
10.0	54.0	15.80	38.200	4.759
10.5	58.5	15.90	42.600	4.774
11.0	64.0	15.90	48.100	4.788
11.5	68.5	15.90	52.600	4.799

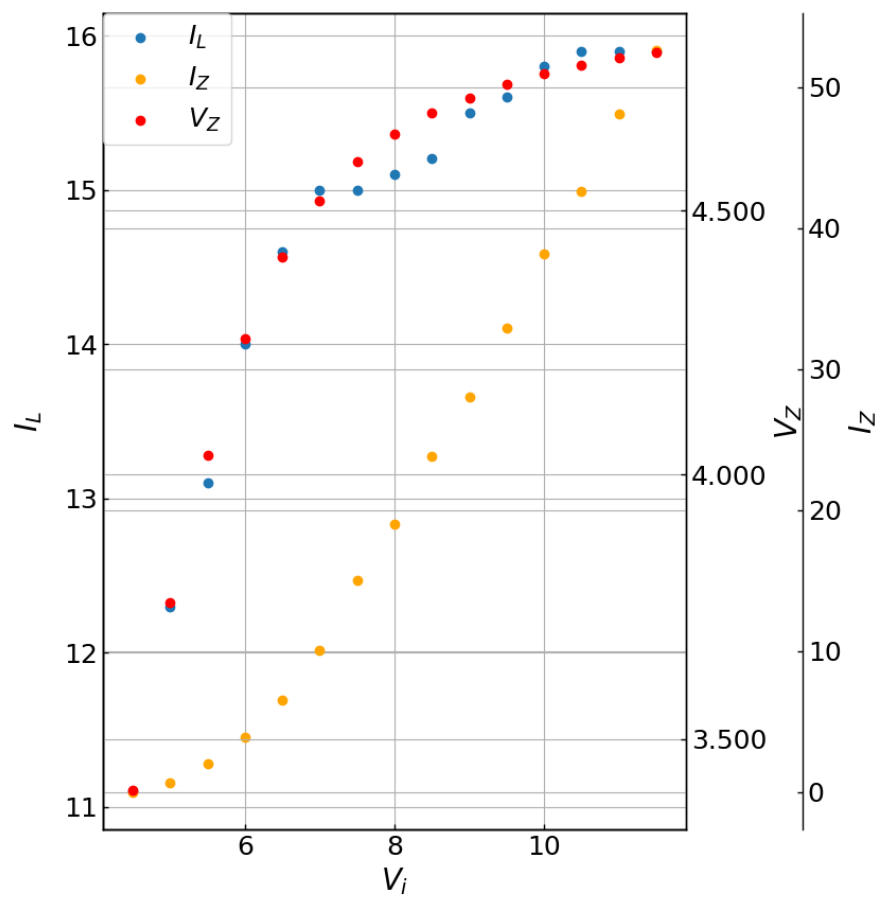


図.10: 電源電圧変化の場合グラフ

3.5 整流回路と平滑

1. 図. 11 の回路を組み, 発振器の出力を $V = 8V_{PP}$, $f = 100Hz$ の正弦波としたときの R の両端の波形を記録し 1-1' に CH1 を, 2-2' に CH2 を接続した. オシロスコープで観測し記録した結果を, 図. 12 に示す. 負荷に並列に平滑コンデンサ $5\mu F$ を挿入し波形を記録した結果を, 図. 13 に示す. また, 平滑コンデンサを $33\mu F$ とした時の波形も記録した結果を, 図. 14 に示す.

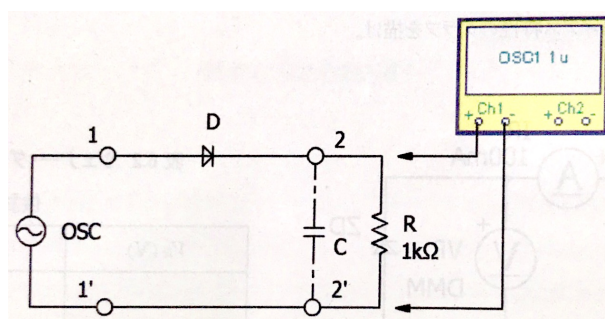


図.11: 半波整流回路

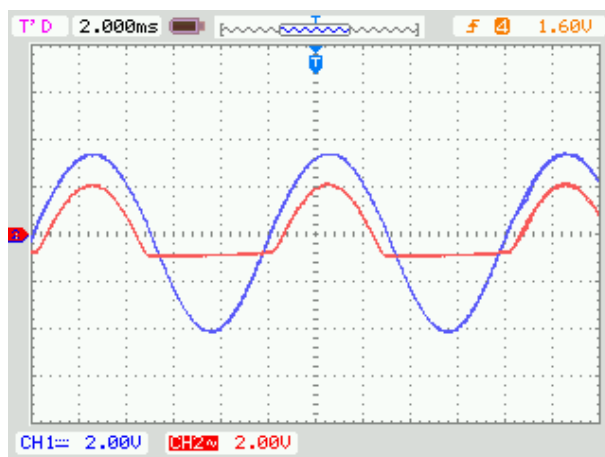


図.12: コンデンサ無し

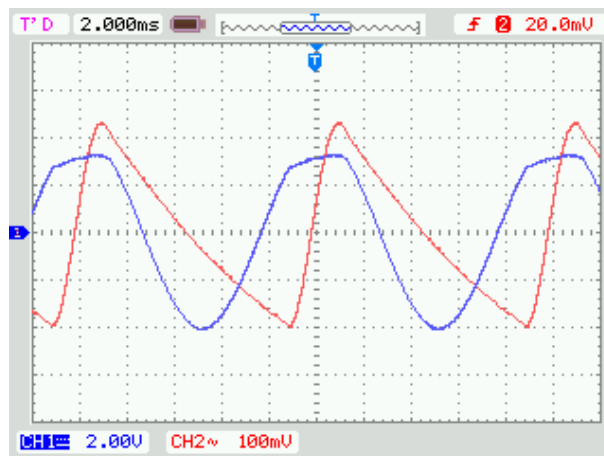


図.13: 5 μ F の平滑コンデンサ

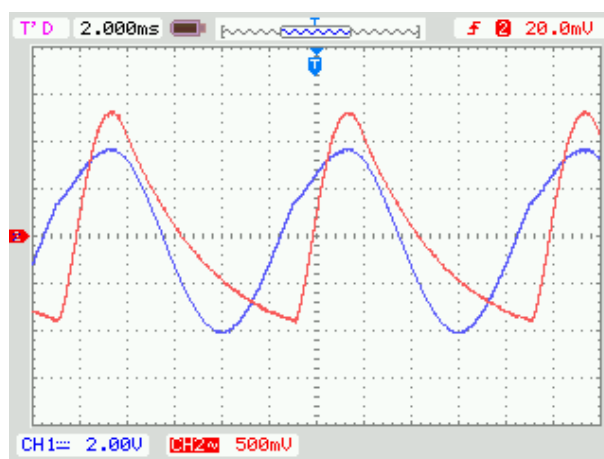


図.14: 33 μ F の平滑コンデンサ

1. C の定格電圧, R の定格電力に注意し, 発振器の出力電圧, 周波数を適当に変え同様に観測せよ.

	平滑コンデンサ	$V_{PP}(\text{V})$	$f(\text{Hz})$
1 回目	$5\mu\text{F}$	20	1k
2 回目	$5\mu\text{F}$	5	10

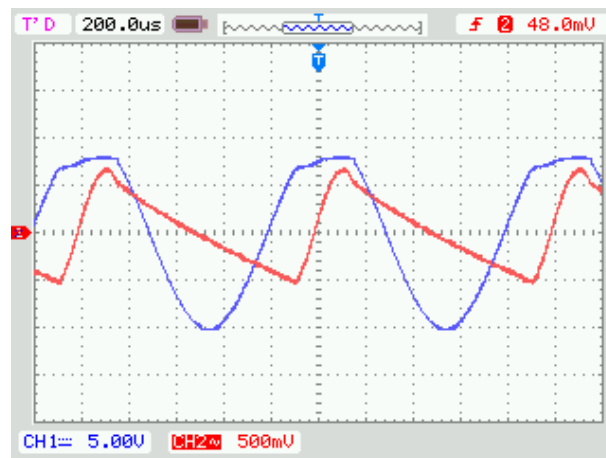


図.15: 1 回目

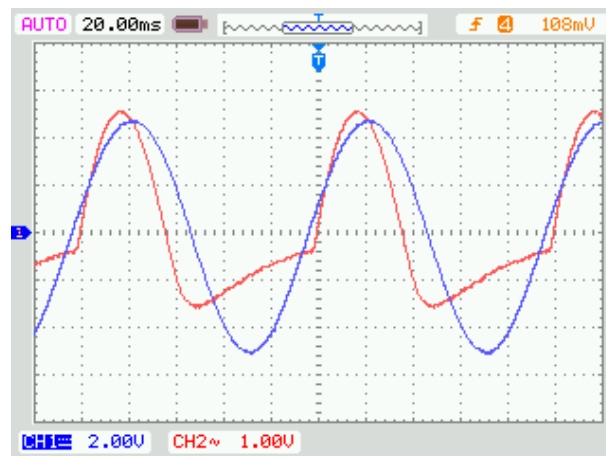


図.16: 2 回目

2. 図. 17 の回路を組み, 発振器の出力を $V=8V_{PP}$, $f=100\text{Hz}$ の正弦波としたときの R の両端の波形をオシロスコープで観測し記録した. 1-1' に CH1 を, 2-1' に

CH2 を, 2'-1' に CH3 を接続し math 機能を使用し, 2-2' 間の波形を表示・記録した。結果を, 図. 18 に示す。負荷に並列に平滑コンデンサ $5\mu\text{F}$ を挿入し波形を記録した結果を, 図. 19 に示す。また, 平滑コンデンサを $33\mu\text{F}$ とした時の波形も記録した結果を, 図. 20 に示す。

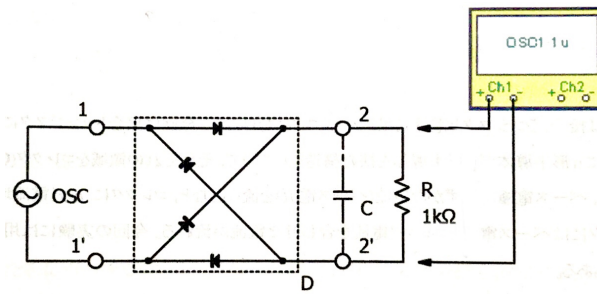


図.17: 全波整流回路

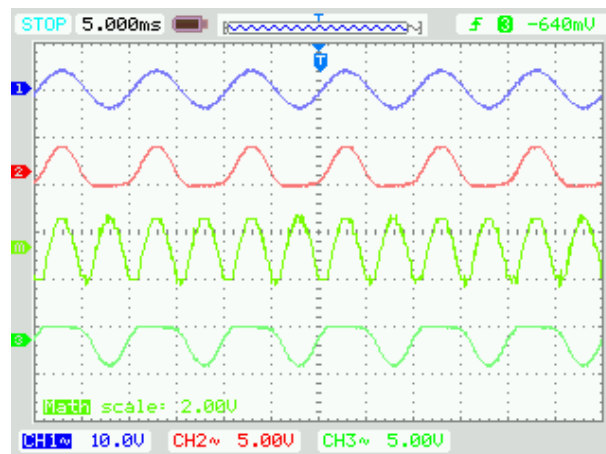


図.18: $V = 8V_{PP}$, $f = 100\text{Hz}$

3. C の定格電圧, R の定格電力に注意し, 発振器の出力電圧, 周波数を適当に変え同様に観測せよ。オシロスコープでの波形を図. 21, 図. 22 に示す。

	$V_{PP}(\text{V})$	$f(\text{Hz})$
1 回目	8	1k
2 回目	8	50

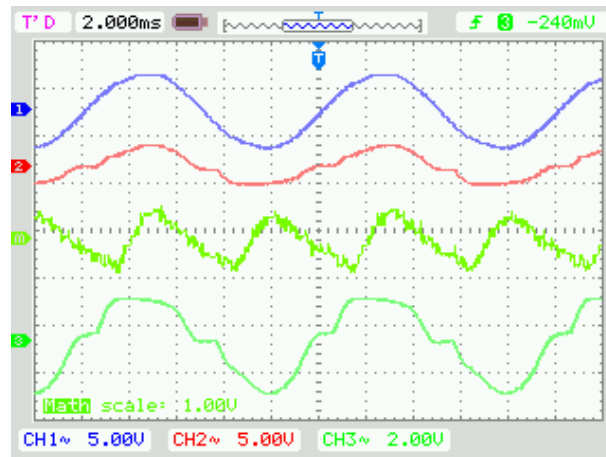


図.19: 5 μ F の平滑コンデンサ

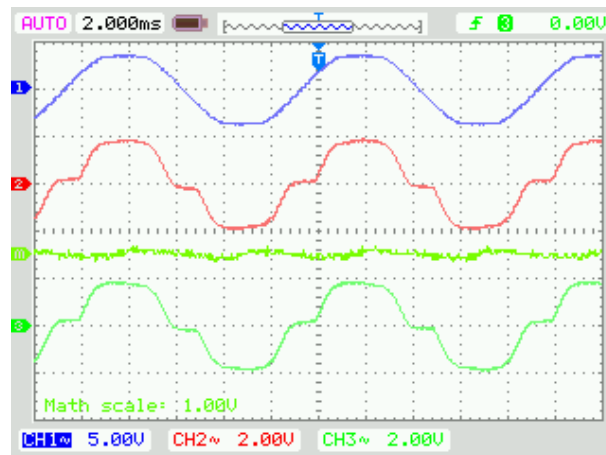


図.20: 33 μ F の平滑コンデンサ

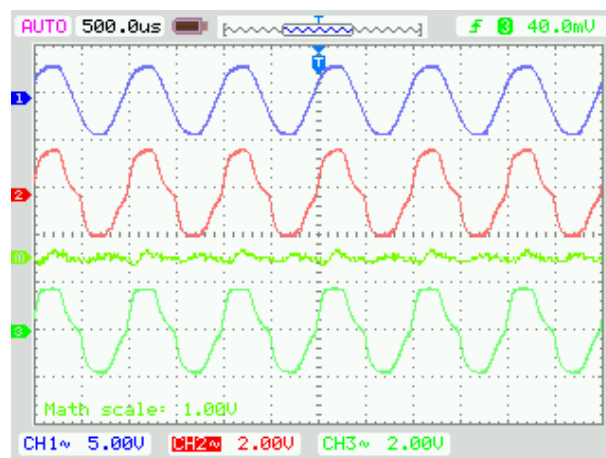


図.21: 1 回目

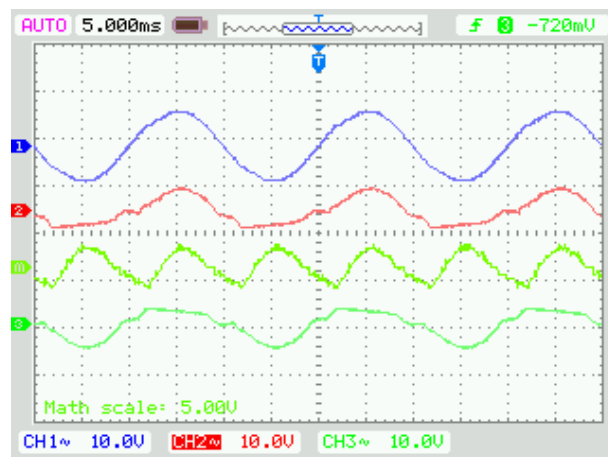


図.22: 2 回目

3.6 逆回復時間の観測実験

図. 23 の回路を組み, 発振器の出力を $V = 8V_{PP}$ の矩形波とし, 周波数が $100Hz$ の場合と $50kHz$ の場合について, 一般整流用ダイオードと SBD の整流波形を観測し記録し、オシロスコープでの波形を図. 24 ~ 図. 27 に示す 1-1' に CH1 を, 2-2' に CH2 を接続せよ.

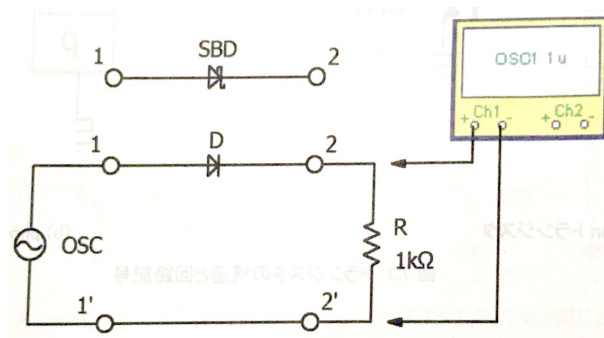


図.23: 逆回復時間実験回路

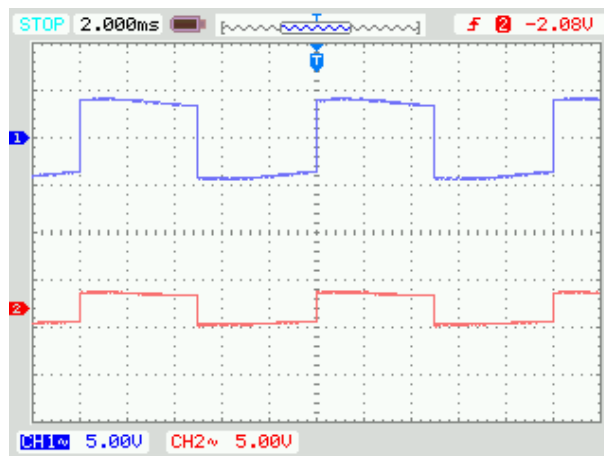


図.24: 一般整流用ダイオード $100Hz$

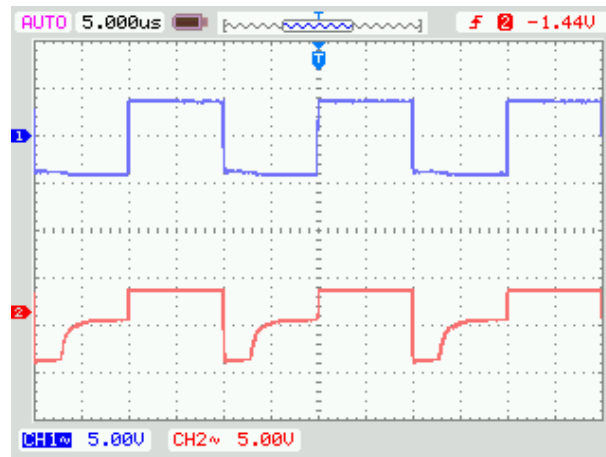


図.25: 一般整流用ダイオード 50kHz

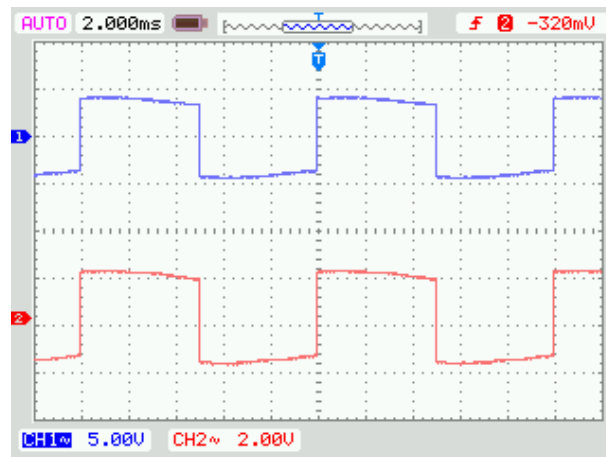


図.26: SBD 100Hz

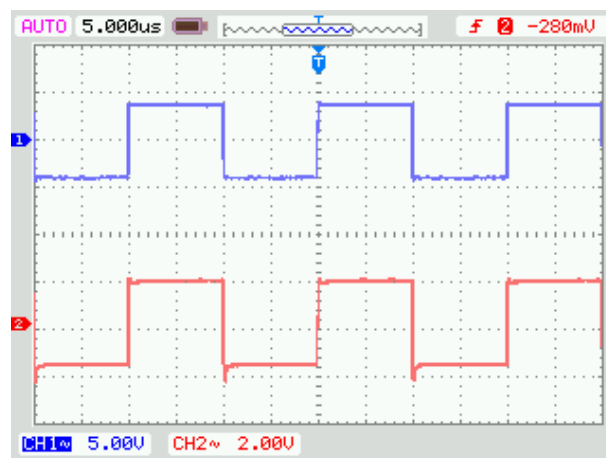


図.27: SBD 50kHz

4 考察及び検討

1. $I_S = 5 \times 10^{-15} \text{ A}$ として順電流を計算し, 実験結果と比較せよ.
式中の物理定数を次のように設定する.

$$\begin{aligned} q(\text{電気素量}) &= 1.602176565 \times 10^{-19} (\text{C}) \\ k(\text{ボルツマン定数}) &= 1.3806488 \times 10^{-23} (\text{JK}^{-1}) \\ T(\text{絶対温度}) &= 17.3 + 273.15 = 290.45 (\text{K}) \\ e(\text{ネイピア数}) &= 2.718281828 \end{aligned}$$

すると式. 1 を用いると, 表. 7 のような結果になった.

表.7: 実測値と計測値の比較

$V_F(\text{V})$	$I_F(\text{mA})(\text{測定値})$	$I_F(\text{mA})(\text{計算値})$
0.000	0.00	0.0000
0.106	0.00	0.0000
0.208	0.00	0.0000
0.300	0.00	0.0000
0.404	0.00	0.0001
0.425	0.01	0.0001
0.450	0.05	0.0003
0.499	0.30	0.0023
0.603	1.60	0.1452
0.700	12.00	7.0001
0.750	35.10	51.6044
0.800	96.50	380.4239

測定値と計算値との誤差は, 変数である絶対温度 T と, 測定電圧である V_F の計測誤差によるものだと考えられる. なぜなら, これらの値はすべてパラメータを調整した e の指数関数上にプロットできるからである.

2. 定電圧回路で電源電圧 V_i 一定で, 負荷電流 I_L を増加していった場合の動作を説明

せよ. $I_Z = 0$ になった時の V_Z を式で示せ.

図. 9 より, ツェナーダイオードには 4V 以上の電圧をかけないと電流は流れないことが分かる. また, 式. 2, 式. 3 より,

$$I_Z = \frac{(V_i - V_Z)}{R_1} - I_L$$

となる. これより I_L が増加すると, V_Z が低下し, 4V 以下になる.

$I_Z = 0$ のとき, $I_L = I_{R1}$ となる. よって,

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{(V_i - V_Z)}{R_1} \\ I_L R_1 &= V_i - V_Z \\ V_i &= I_L R_1 + V_Z \end{aligned}$$

3. 定電圧回路で電源電圧 V_i を増加していった場合の動作を説明せよ.

図. 10 より, I_Z は V_Z が 6V を超えたあたりから急激に増加していることが分かる. これは回路にツェナーダイオードを使用しているため, 逆電圧降伏が起きたと考えられる.

4. $I_Z = 30\text{mA}$ における電圧安定係数 S , 出力抵抗 R_O を求めよ.

表. 4 より, $I_Z = 30\text{mA}$ 付近のデータを用いると, 次のとおりになる.

$$\begin{aligned} S &= \frac{\Delta V_Z}{\Delta V_i} = \frac{4.738 - 4.713}{9.5 - 9.0} = 0.05 \\ R_O &= \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_L} = \frac{4.738 - 4.713}{(15.60 - 15.50) \times 10^{-3}} = 0.25 \times 10^3 = 250 \end{aligned}$$

5. 整流回路実験で, 平滑コンデンサを挿入した場合の波形について説明せよ.

図. 12 では平滑コンデンサを挿入していないため, 一般的な半波整流となっている. それに対して, 図. 13, 図. 14 では平滑コンデンサを挿入しているため, CH1 が負の値を取った時でも平滑コンデンサにチャージされている電圧が生じ続けている. また 図. 13 は平滑コンデンサが 5 μF であるのに対して, 図. 14 は 33 μF のため 5 μF 比べ消費が穏やかであり曲線を描いている.

6. 一般整流用ダイオードの逆回復時間を求めよ.

図. 25 を図. 28 のようにして求めると,

$$20.07(mm) : 11.96(mm) = 5.000(\mu s) : x(\mu s)$$

$$x = \frac{11.96 \times 5}{20.07}$$

$$= 2.98(\mu s)$$

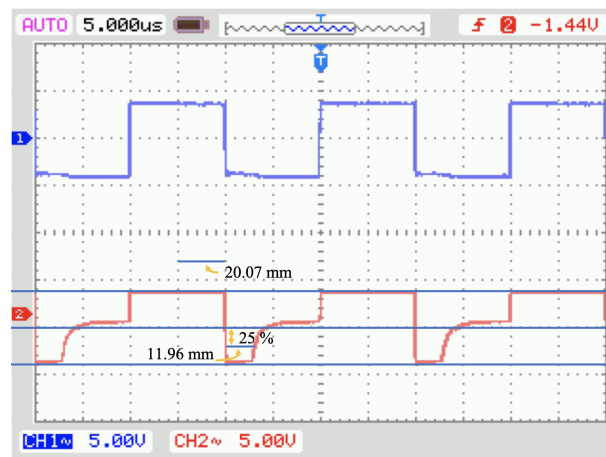


図.28: 一般整流用ダイオード 50kHz の逆回復時間

7. 総合的考察を行え.

一般家庭に流入している交流電力などの正弦波もダイオードを使うことで全波整流にし、それをコンデンサを通すことで、平滑することで安定した電力の供給ができることがわかった。また周囲の温度だけでなく抵抗などの発熱に伴い、電力を消費することで計算値と計測値に大きな誤差が生じることがわかった。そして同じ正弦波でも低周波・高周波に切り替わることで、ダイオードのスイッチング特性などに影響を大きく与え同じ結果にならないことがわかった。以上のことより、基板作成時には適した素子や定格電圧・定格電力、容量に気をつけて回路設計を行いたいと思った。

参考文献

- 菅 博, 田中 誠ほか:増補改訂版 図説電子デバイス, 産業図書 (2011)