

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

2 ダイオードの特性

実験日 令和4年5月12日(木)
令和4年5月19日(木)

班	学生番号	氏名
2	3318	鈴木春香

共同実験者名

3302 新川 史人, 3310 岡村 放, 3314 城戸 貴博

3327 猶崎 稜真

提出日			備考	評価
予定日	5/19	5/26		
提出日				

東京都立産業技術高等専門学校
電気電子工学コース

1 目的

今回の実験では以下の2点を目的とする。

- ダイオードの原理を知り、実験により整流作用を理解することでダイオードを使用できるようにする。
- ツェナーダイオードの特性を学び、ツェナーダイオードを使用できるようにする。
- 太陽電池の特性を知り、使用できるようにする。

2 原理

2.1 ダイオード

半導体内部には、電子と正孔がキャリアとして存在している。真性半導体には4価のシリコンがよく使われる。真性半導体に微量の不純物を混入させたものを不純物半導体と言い、不純物としてリンやヒ素のような5価の元素(ドナー)を用いたものをn型半導体、ホウ素やガリウムのような3価の元素(アクセプタ)を用いたものをp型半導体と呼ぶ。

図1のように、p型半導体とn型半導体を接合し、端子を付けたものをダイオードと呼ぶ。ダイオード内部において、正孔はp型半導体内では多数キャリア、n型半導体内では少数キャリアであるから、より密度の大きいp型領域からn型領域へ流れ込む。この現象を拡散と呼ぶ。また、n領域へ拡散した正孔はn領域内の電子と結合し、双方とも消滅する。したがって、n領域では正に帯電したドナーイオンが、p領域では負に帯電したアクセプタイオンのみが残る、平衡状態となる。この結果、pn接合近傍にはキャリアの存在しない空乏層が形成される。空乏層では、電化分布によりp領域側からn領域側へ電位差が発生しこれを拡散電位と呼ぶ。

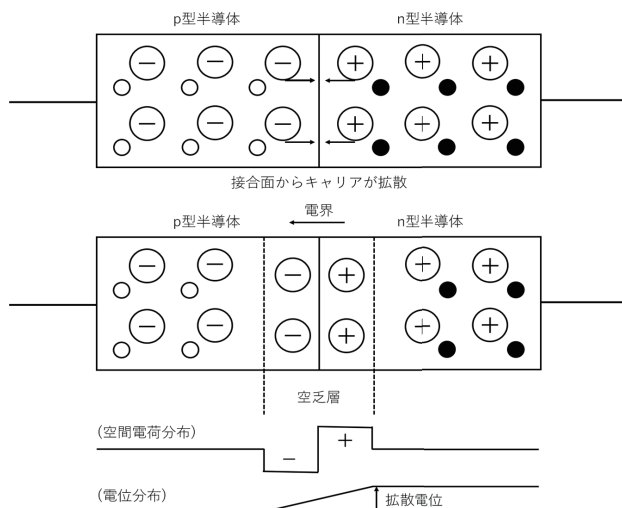


図 1: pn 接合と空乏層

図2のようにp型半導体に正、n型半導体に負の電圧を加えると、p領域とn領域の電位差は拡散電圧+印加電圧となり、電圧差が減少するため拡散電位により阻止されていたキャリアの拡散が起こる。このとき、ダイオードに印加した電圧、流れた電流を、それぞれ順方向電圧、順方向電流という。逆に、n型半導体に正、p型半導体に負の電圧を加えると、p領域とn領域の電圧差が大きくなるため電流は殆ど流れなくなる。このとき、ダイオードに加えた電圧、流れた電流を、それぞれ逆方向電圧、逆方向電流という。また、この電圧のかけ方を逆バイアスという。

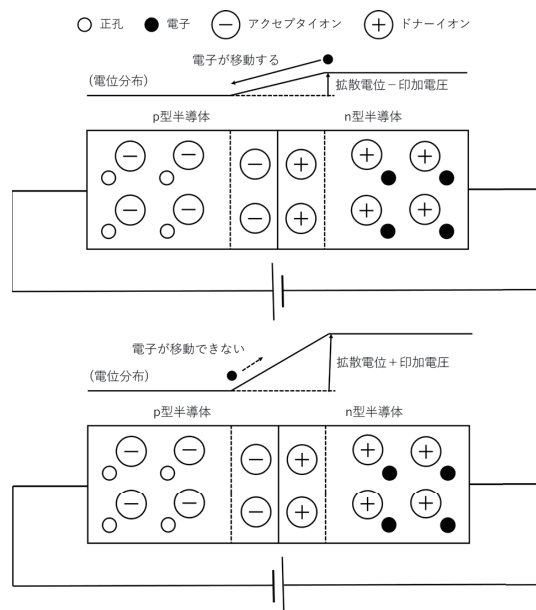


図 2: ダイオードの動作原理

2.2 ツェナーダイオード

ツェナーダイオードは定電圧ダイオードとも呼ばれ、加わる電圧がある一定の値 (ツェナー電圧) を上回ると、急激に電流が流れるようになる素子である。このとき流れる電流をツェナー電流と呼ぶ。入力電圧の増加に伴いツェナー電流が増加するため、出力電圧は一定に保たれる。すなわち、ツェナーダイオードは端子間電圧がツェナー電圧以上なら ON、ツェナー電圧以下なら OFF といったようにスイッチと似たような動作をして、ほぼ一定の電圧を維持する素子である。

2.3 太陽電池

太陽電池は様々な種類のものがあるが、本実験では最も基本的な構造である結晶シリコン太陽電池を用いる。結晶シリコン太陽電池の構造は、図 3 のような上段が n 形半導体、下段が p 形半導体となっており、pn 結合している。図 4 で示すように、光が照射されると光のエネルギーにより接合面の電子は n 形半導体へ、正孔は p 形半導体へ移動し、起電力が発生する (光起電力効果)。この起電力は、光が照射されている間は持続し外部に負荷を接続しておけば電力を供給することができる。また、電子は負荷を通過して p 形半導体に戻り、正孔と結合する。

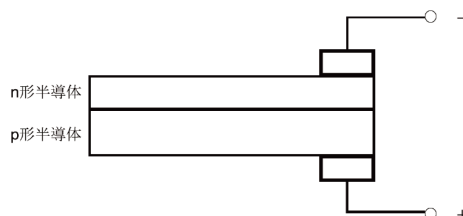


図 3: 結晶シリコン太陽電池の構造

太陽電池の電流-電圧特性は図 5 に示したようなダイオードの特性を下にシフトした特性となる。ここで電流値は負の値になるが、正に消費と考えていたので負の値は発電していることを意味する。一般的には、発電した電力も正の値で表現するので、縦軸を反転させる (図 5 参照)。また、太陽電池の電

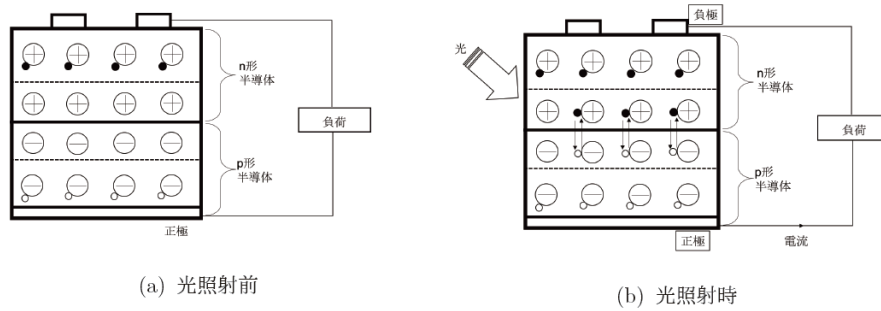


図 4: 太陽電池の動作原理

流-電圧特性を I-V カーブ、電力-電圧特性を P-V カーブと呼ぶ。図 6 に示すように、I-V カーブは第 1 象限のみを表示する。

ここで電圧が 0 V になる《短絡する》時の電流を短絡電流 (I_{sc})、電流が 0 A になる電圧を解放電圧 (V_{oc}) と呼ぶ。また、縦軸を電力とした図 6 に示す P-V カーブからわかる通り、太陽電池はどのような電圧で利用しても同じ電力を得られるわけではない。太陽電池を有効に活用するためには、発電電力が最大になる最大電力点で利用する必要がある。

ここで、発電電力が最大になる電力を最大電力 (P_{max})、その時の電圧を最適動作電圧 (V_{pm}) と呼ぶ。 P_{max} は、気象条件によって大きく変化し V_{pm} も変化してしまう。そのため、太陽電池を利用したシステム（太陽光発電システム）では、常に P_{max} を追従する制御である MPPT 制御（Maximum Power Point Tracking：最大電力点追尾）が具備されている。MPPT には様々な手法があるが、その手法を考える上でも太陽電池の I-V カーブの測定は非常に重要である。

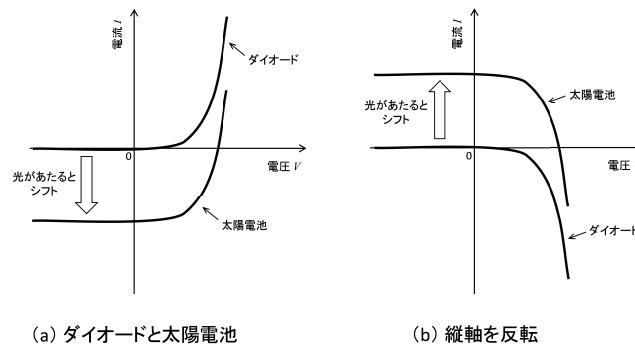


図 5: ダイオードと太陽電池の電流-電圧特性

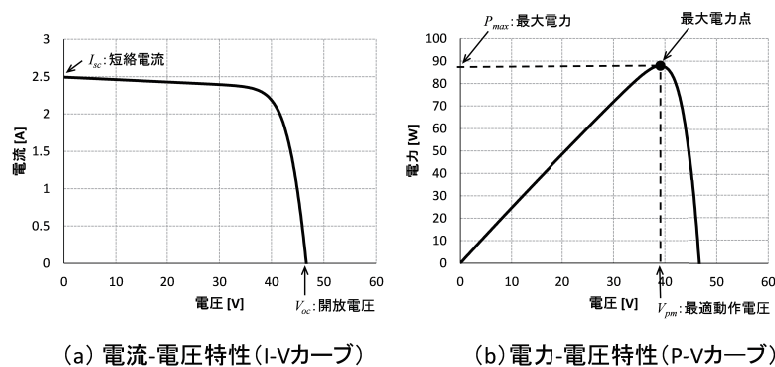


図 6: 太陽電池の発電特性（左：I-V カーブ、右：P-V カーブ）

3 ダイオードの特性実験

3.1 使用器具

ダイオードの特性実験の使用機材を以下の表 1 に示す.

表 1: 使用器具

使用器具名	製造元	型番	製造番号 (管理番号)
電流計 (ミリアンペア計)	YOKOGAWA	E-CLASS 1.0	48-2
電圧計	YOKOGAWA	E-CLASS 1.0	278-20
電源装置	YOKOGAWA	PA1811	L69-000668

3.2 順バイアス

3.2.1 実験方法

- 図 7 に示した順バイアスの測定回路をノートに描き, その通りに回路を組んだ. この時, 抵抗は $R_1 = R_2 = 10\ [\Omega]$ を並列接続して $5\ \Omega$ として使用し, ダイオードは 1N4002 を使用した.
- 直流電源装置から $E\ [\text{V}]$ 電圧を印加し, 電圧 V_D と電流 I_D を読み取った.
 - 電圧 V_D は $0.8\ \text{V}$ から $0\ \text{V}$ まで $0.1\ \text{V}$ 刻みで減少させた.
 - $V_D - I_D$ 特性をグラフに描き, 教員のチェックを受けた. 適宜データを追加した.

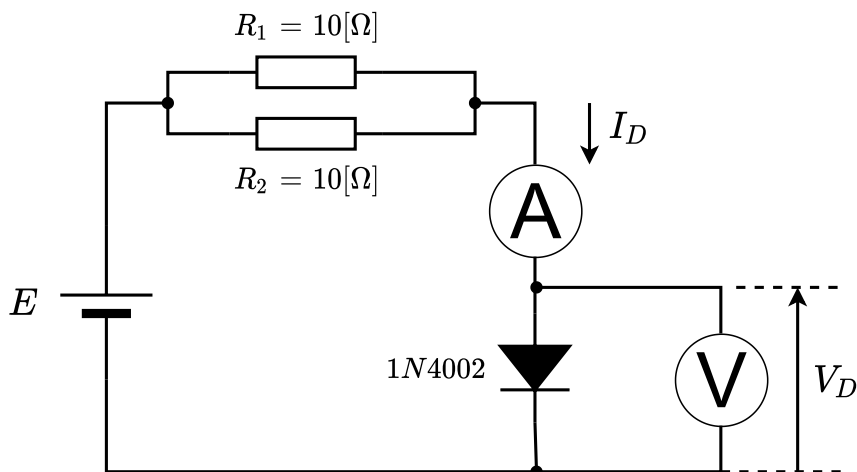


図 7: 順バイアスの測定回路

3.2.2 結果

表 2 はダイオードの順バイアスの特性の測定結果の表である．また，図 8 は表 2 を横軸 V_D [V]，縦軸 I_D [mA] のグラフとして表したものである．この表と図から電圧が 0.60 V 以上のとき電流が流れていることが分かる．

表 2: ダイオードの順バイアスの特性の測定結果

電圧 (順バイアス) V_D [V]	電流 I_D [mA]
0.000	0.00
0.100	0.00
0.200	0.00
0.300	0.00
0.400	0.000
0.500	0.000
0.600	0.500
0.648	5.000
0.678	10.00
0.700	17.50
0.722	30.00
0.746	50.00
0.760	75.00
0.770	100.0
0.788	150.0
0.800	182.5

3.2.3 考察

図 9 は図 8 のダイオードの電流グラフに，立ち上がり電圧と負荷線を加えて図に示したものである．黒丸は立ち上がり電圧を示している．この図より負荷線の y 軸との切片は 160，x 軸との切片は 0.8 であると分かる．負荷線は $E = 0.8$ V としたときのものである．また，動作点 P の微分抵抗 $r_d = \Delta V_D / \Delta I_D$ は，表 2 の電圧 $V_{D1} = 0.722$ [V]， $V_{D2} = 0.70$ [V] と電流 $I_{D1} = 30 * 10^{-3}$ [A]， $I_{D2} = 17.5 * 10^{-3}$ [A] より，(1) 式となる．

$$\begin{aligned} r_d &= \Delta V_D / \Delta I_D \\ &= \frac{V_{D1} - V_{D2}}{I_{D1} - I_{D2}} \\ &= \frac{0.722 - 0.70}{30 * 10^{-3} - 17.5 * 10^{-3}} \\ &= 1.76 [\Omega] \end{aligned} \tag{1}$$

よって微分抵抗 r_d は 1.76Ω であると分かる．

また，図 10 は理想ダイオードからなるダイオードの等価回路を表したものである．この図において， V_f は電源電圧と逆向きに置くことによってダイオードに電流が流れるのを遅らせ，立ち上がり電圧が 0V よりも大きくなることを表している． r_d は電流の増幅が垂直ではなく緩やかに上がっていくことを表している．

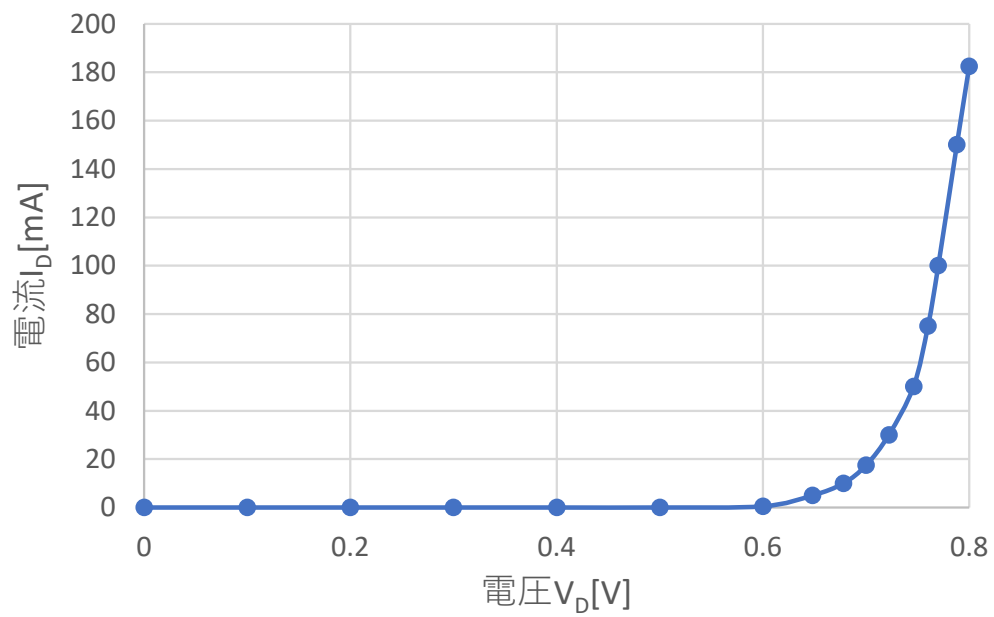


図 8: ダイオードの順バイアスの電圧電流特性

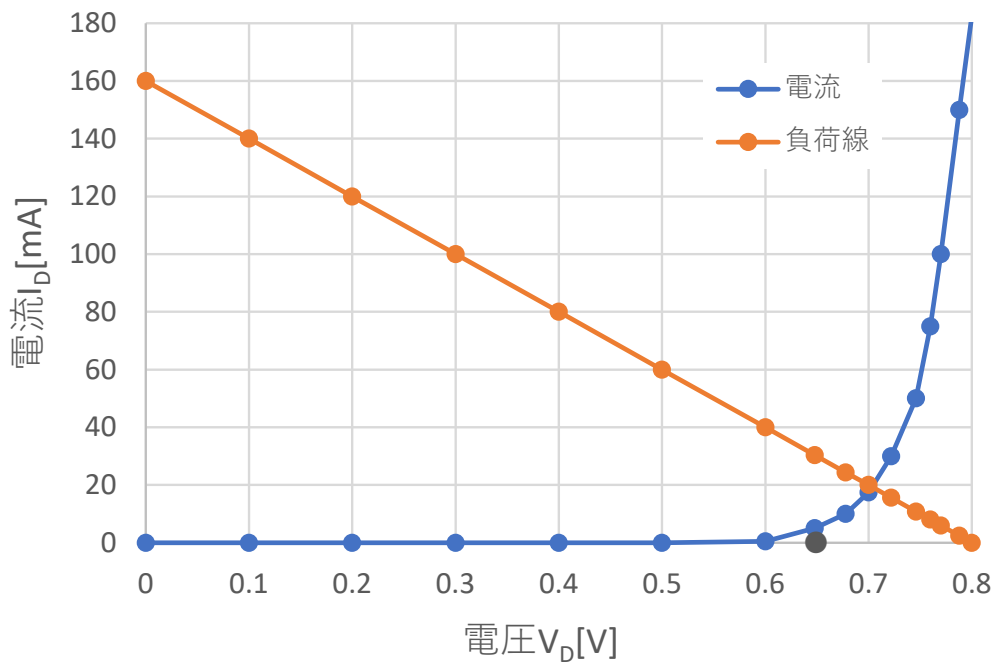


図 9: ダイオードの電流と立ち上がり電圧と負荷線

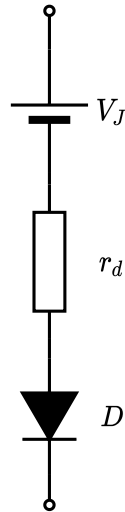


図 10: r_d と V_J と理想ダイオードからなる等価回路

3.3 逆バイアス

3.3.1 実験方法

- i) 図 11 に示した逆バイアスの測定回路をノートに描き，その通りに回路を組んだ．この時，抵抗は $R_1 = R_2 = 10\ [\Omega]$ を並列接続して $5\ [\Omega]$ として使用し，ダイオードは 1N4002 を使用した．
- ii) 直流電源装置から $E\ [\text{V}]$ 電圧を印加し，電圧 V_D と電流 I_D を読み取った．
 - a) 電圧 V_D は $8\ \text{V}$ から $0\ \text{V}$ まで $1\ \text{V}$ 刻みで減少させた．
 - b) $V_D - I_D$ 特性をグラフに描き，教員のチェックを受けた．

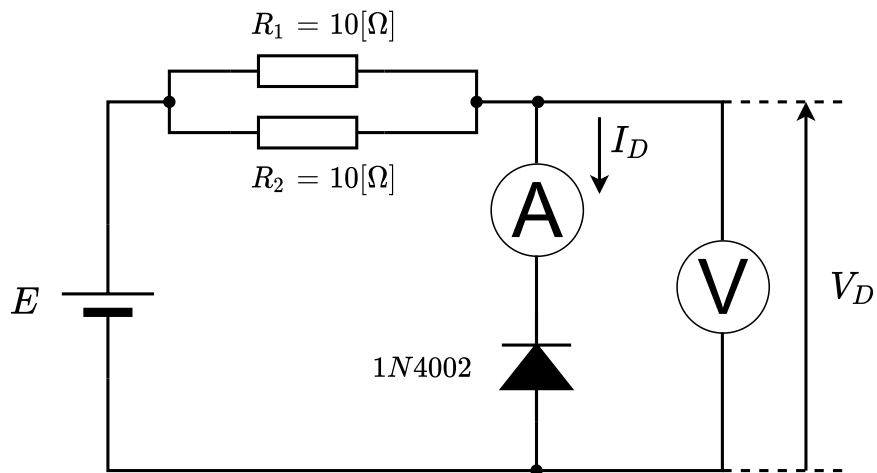


図 11: 逆バイアスの測定回路

3.3.2 結果

表 3 はダイオードの逆バイアスの特性の測定結果の表である．また，図 12 は表 3 を横軸 $V_D\ [\text{V}]$ ，縦軸 $I_D\ [\text{mA}]$ のグラフとして表したものである．この表と図から電圧を $8\ \text{V}$ かけても電流が流れないことが分かる．

表 3: ダイオードの逆バイアスの特性の測定結果

電圧 (逆バイアス) V_D [V]	電流 I_D [mA]
0.0	0.0
1.0	0.0
2.0	0.0
3.0	0.0
4.0	0.0
5.0	0.0
6.0	0.0
7.0	0.0
8.0	0.0

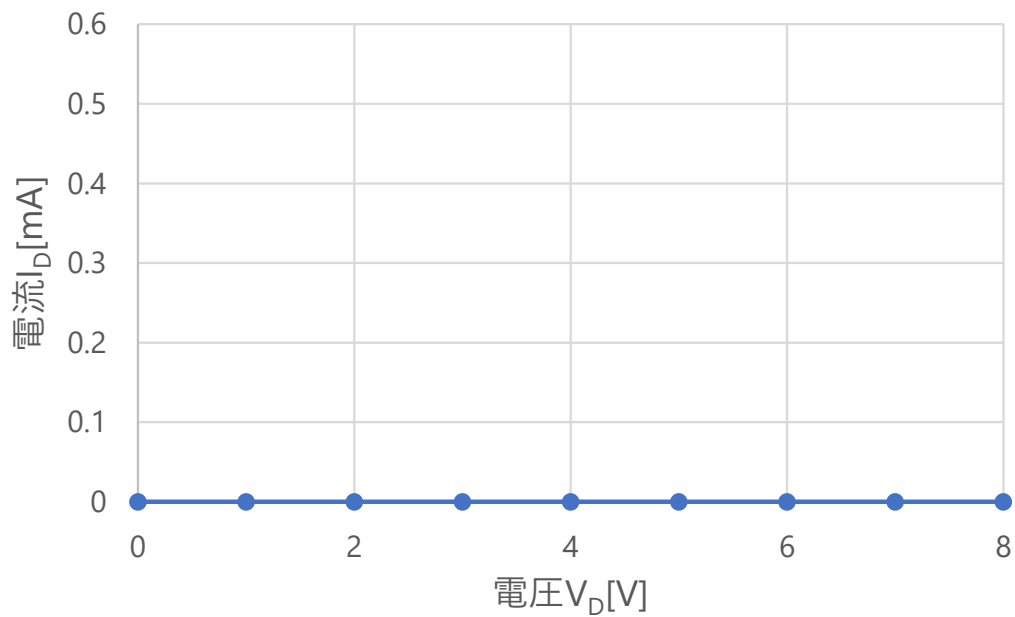


図 12: ダイオードの逆バイアスの電圧電流特性

3.3.3 考察

実験で用いた 1N4002 の逆方向電流の値はデータシートから $30 \mu\text{A}$ だと分かる．また，逆バイアスでも電流は流れる．これは図 2 からわかる．逆向きに電圧をかけると多数キャリアが電源側に引き寄せられ空乏層ができる．このとき，空乏層内の少数キャリアが空乏層内で多数キャリアに引き寄せられて電解が発生する．これにより，ドリフトと呼ばれる逆方向電流が流れると考えられる．

4 ツェナーダイオードの特性実験

4.1 使用器具

ツェナーダイオードの特性実験の使用機材を以下の表 4 に示す。

表 4: 使用器具

使用器具名	製造元	型番	製造番号 (管理番号)
電流計 (ミリアンペア計)1	YOKOGAWA	E-CLASS 1.0	48-2
電流計 (ミリアンペア計)2	YOKOGAWA	E-CLASS 1.0	578
電圧計	YOKOGAWA	E-CLASS 1.0	278-20
電源装置	YOKOGAWA	PA1811	L69-000668
可変抵抗 3	TOKUSHU DENKI KOGYOSHO	S-3	3201

4.2 ツェナーダイオードの特性

4.2.1 実験方法

- 図 13 に示したツェナーダイオード特性回路をノートに描き，その通りに回路を組んだ。この時，抵抗は $R = 300 [\Omega]$ ， $R_L = 1.0 [k\Omega]$ ，ダイオードは 1N4736A を使用した。
- 電圧電源から $E [V]$ 電圧を印加し，電圧 V_L と電流 I_Z を読み取った。

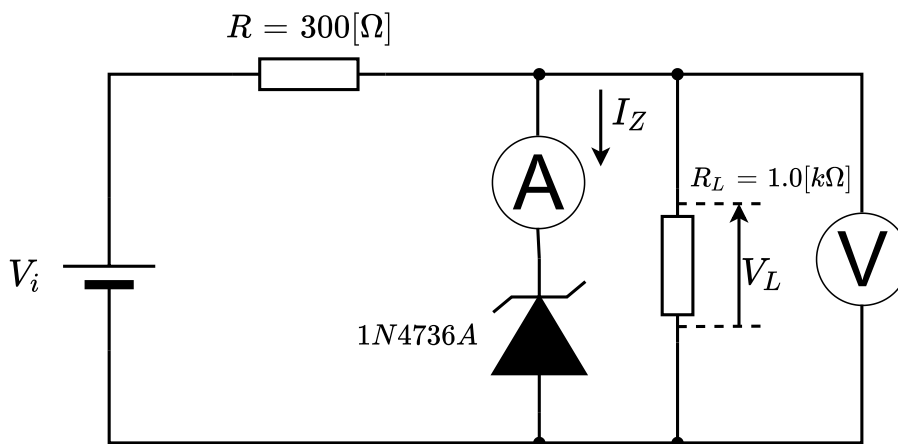


図 13: ツェナーダイオードの特性回路

4.2.2 結果

表 5 はツェナーダイオードの特性測定結果である。また，図 14 は表 5 を横軸電圧 $V_i [V]$ ，左の縦軸ツェナー電流 $I_Z [mA]$ ，右の出力電圧 $V_L [V]$ としてグラフで表したものである。この表と図から電圧 V_i と出力電圧 V_L 特性は 0 V から 8 V の時電圧は，線形性があると分かる。また，8 V からは電圧の値がほぼ変わってないことが分かる。

表 5: ツェナーダイオード特性の測定結果

入力電圧 V_i [V]	出力電圧 V_L [V]	ツェナー電流 I_Z [mA]
0.0	0.00	0.00
1.0	0.78	0.00
2.0	1.54	0.00
3.0	2.28	0.00
4.0	3.06	0.00
5.0	3.82	0.00
6.0	4.58	0.00
7.0	5.35	0.00
8.0	6.10	0.00
9.0	6.61	1.00
10	6.64	4.20
11	6.66	7.80
12	6.69	10.8
13	6.72	16.2
14	6.74	17.6
15	6.76	20.8
16	6.78	24.2
17	6.80	27.8
18	6.82	30.8

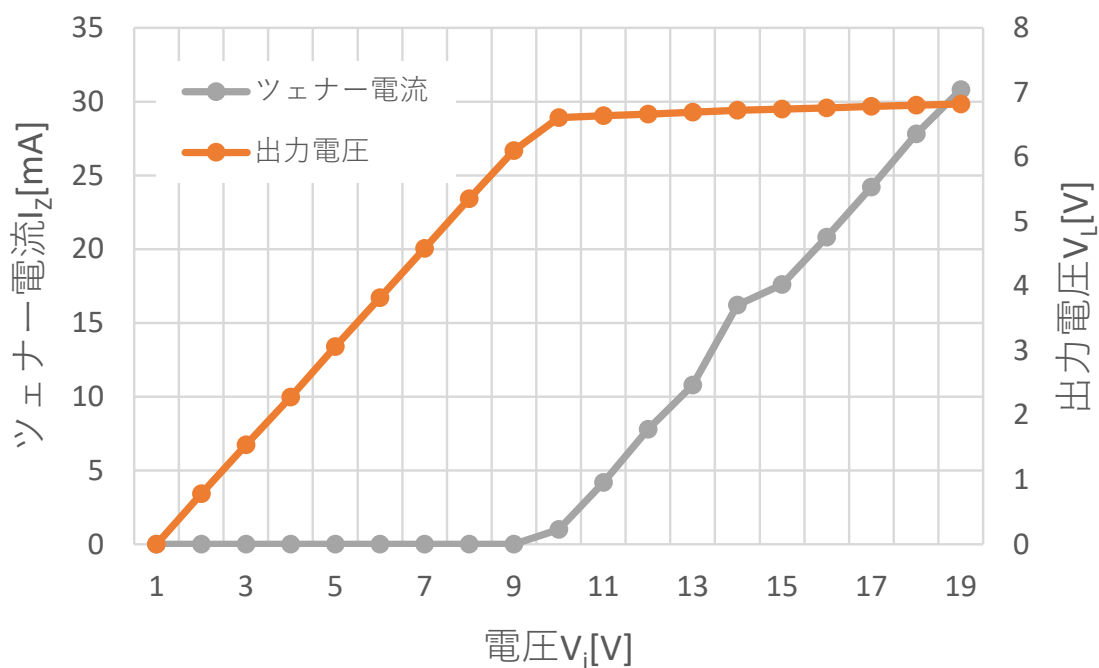


図 14: ツェナーダイオードの電圧 V_i と出力電圧 V_L , 電圧 V_i とツェナー電流 I_Z の特性

4.2.3 考察

- a) 今回用いたツェナーダイオード 1N4736A をダイオード規格表（または，データシート）でツェナー電圧を調べ，実験結果と比較して考察せよ．

実験で用いたダイオード 1N4736A のツェナー電圧はデータシートより 6.8 V で，範囲としては最小値が 6.46 V，最大値が 7.14 V であるということが分かる．これを 4 章の結果と比較すると，6.70 V になっていることから許容の範囲内であるといえる．このことから，この実験は成功していると考えられる．

- b) ツェナーダイオードはどういった場合に用いられるか説明せよ．

主な使用用途は保護回路としての使用である．具体的には，過電流が流れそうになったときツェナーダイオードを接続することにより定電圧になる．これにより，回路に対する影響を減らすことができる．他にも，マイクロコンピュータにツェナーダイオードをいれることによってツェナー電圧以上の電圧をツェナーダイオードがグラウンドに流すことができる．このように，サージや静電気の発生などで過電流が流れ込みそうになった時でも，ツェナー効果で所定の定電圧に換えることで影響を最小限にとどめることができる．

- c) $V_L - I_Z$ 特性のグラフを描き，ツェナー電圧 V_Z を明記せよ．

図 15 はのデータからツェナーダイオードの出力電圧 V_L とツェナー電流 I_Z の特性と立ち上がり電圧 V_Z をグラフに示したものである．この図よりツェナーダイオードの立ち上がり電圧は 6.70 V であることがわかる．また，出力電圧 V_L とツェナー電流 I_Z は立ち上がり電圧から垂直に増加していることが分かる．また，出力電圧が 6.70 V 以下のときはツェナー電流は流れないことが分かる．このことから，ツェナーダイオードは 6.70 V を超えたら ON，超えなかったら OFF といったスイッチの役割をしていると考えられる．

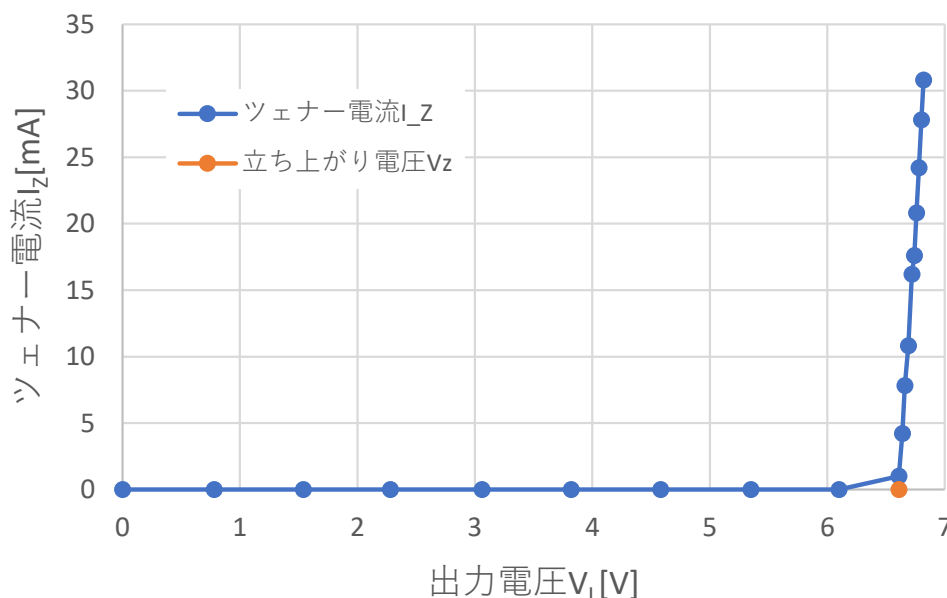


図 15: ツェナーダイオードの出力電圧 V_L とツェナー電流 I_Z の特性

- d) 各グラフから入出力特性を考察せよ．ツェナーダイオードの入力特性は図 14 の電圧 V_i とツェナー電流 I_Z の特性より 7.0 V，つまり立ち上がり電圧の値から電圧が一定になると考えられる．また，出力特性は図 15 より，立ち上がり電圧である 6.70 V で降伏して，電流が垂直に増加していることが分かる．このことから，出力電圧が一定以上の値になると電圧は変化せず電流が流れると考えられる．また，入力電圧が一定以上になると入力電圧にかかわらず出力電圧は一定になると考えられる．

4.3 ツェナーダイオード定電圧回路

4.3.1 実験方法

- i) 図 16 に示したツェナーダイオード特性回路をノートに描き、その通りに回路を組んだ。この時、抵抗は $R = 300 [\Omega]$ 、 R_L は可変、ダイオードは $1N4736A$ を使用した。
- ii) 入力電圧 V_i は $15 [V]$ で固定で出力電圧 V_L と出力電流 I_L を測定した。
 - a) 可変抵抗を変化させてツェナー電流 I_Z は 2 mA 刻みで $2 \sim 22 [\text{mA}]$ まで変化させた。
 - b) $V_L - I_Z$, $I_L - I_Z$ のグラフを描き、教員のチェックを受けた。

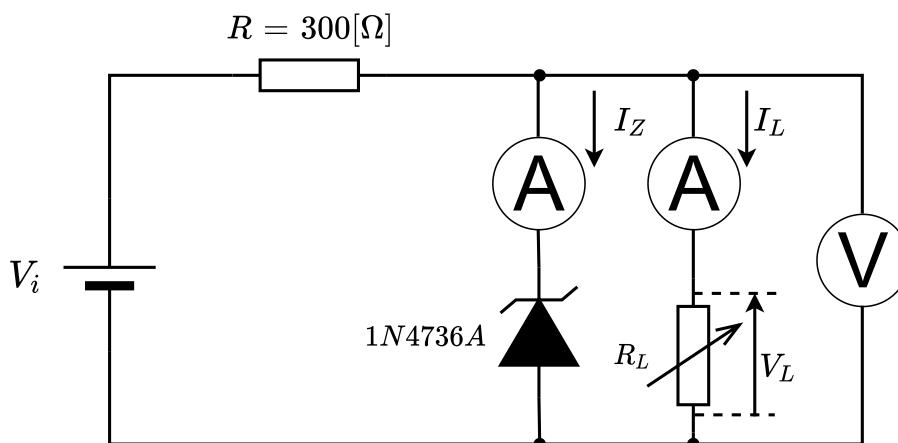


図 16: 定電圧特性の測定回路

4.3.2 結果

表 6 はツェナーダイオード定電圧回路の測定結果の表である。また、図 17 は入力電圧 V_i と抵抗に流れる電流 I_Z の特性を表したものである。この図から、ツェナー電流 I_L にも関わらず、出力電圧はほぼ一定であることが分かる。またその時の出力電圧の値は 6.7 V 程であることが分かる。また、図 18 はツェナー電流 I_L と抵抗に流れる電流 I_Z 特性を表したものである。この図から、 I_L と I_Z の関係には線形性があると言える。

表 6: ツェナーダイオード定電圧回路の測定結果

電流 I_Z [mA]	電圧 V_L [V]	電流 I_L [mA]
2.0	6.60	25.8
4.0	6.62	23.9
6.0	6.62	21.9
8.0	6.64	19.8
10	6.68	17.6
12	6.70	15.6
14	6.76	13.6
16	6.76	11.7
18	6.76	9.70
20	6.78	7.75
22	6.78	5.60

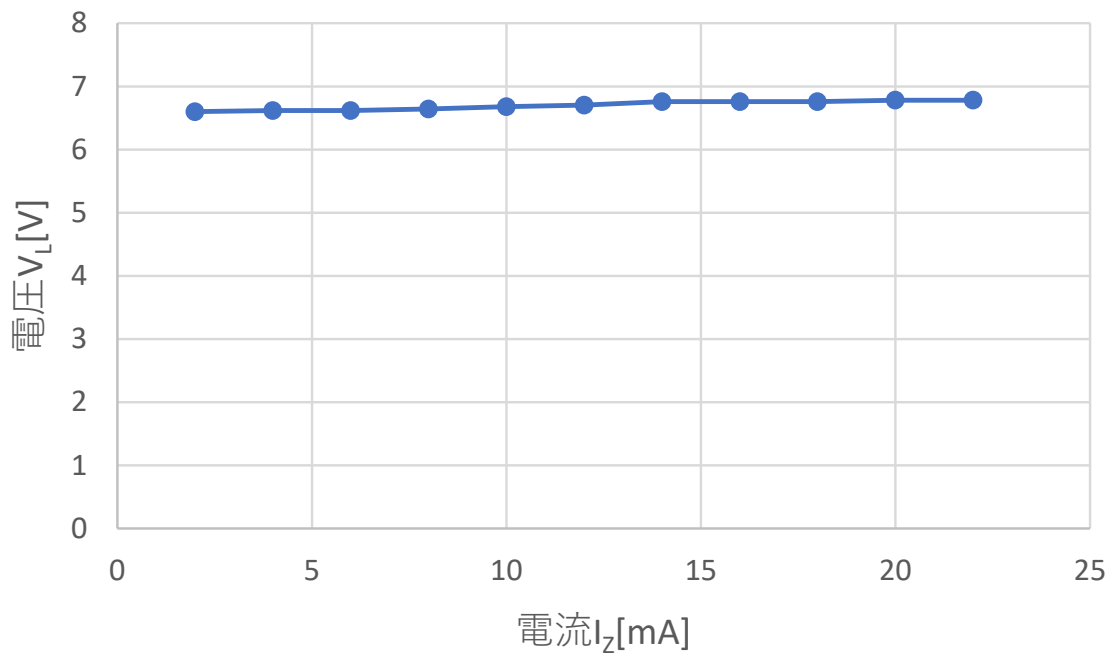


図 17: 入力電圧 V_i と抵抗にながれる電流 I_Z の特性

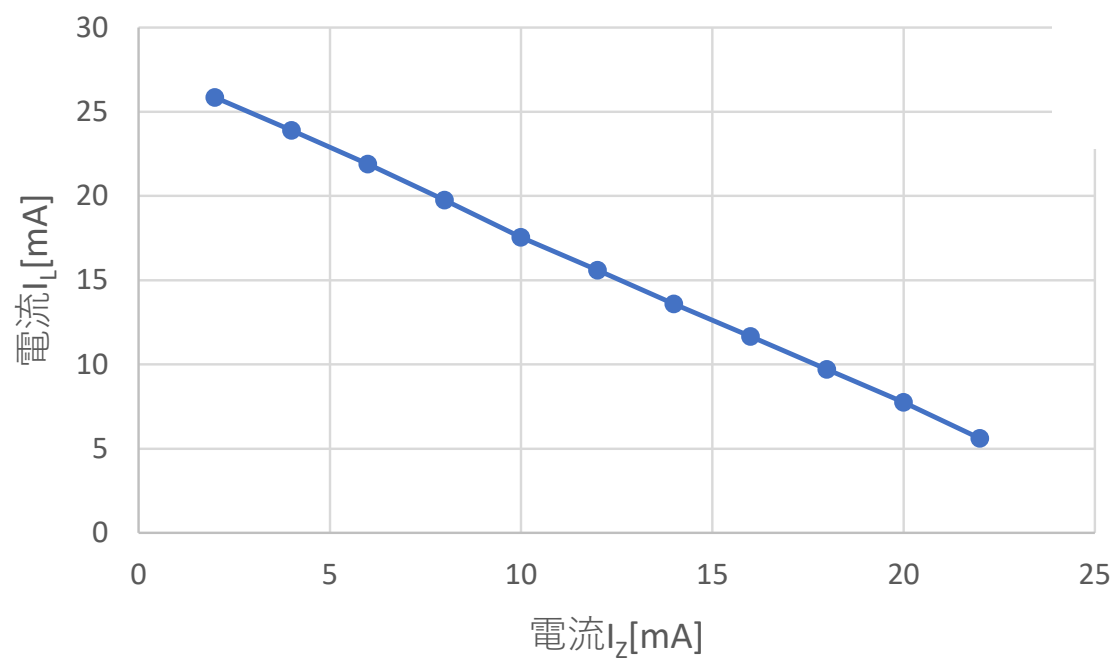


図 18: ツェナー電流 I_L と抵抗に流れる電流 I_Z 特性

4.3.3 考察

- a) 図 3.12 の等価回路図を参考にして，測定結果から R_L, R_Z およびこれらの合成抵抗 R_A を算出せよ．図 19 は，ツェナー定電圧回路の等価回路である．また，表 7 は可変抵抗 R_L とツェナーの抵抗 R_Z とその合成抵抗 R_A の値を表で表したものである． R_L とツェナーの抵抗 R_Z の値は各抵抗にかかる電圧と電流が分かることからオームの法則から算出できるといえる．また，合成抵抗の値は並列で接続されていることから和分の積で求められるといえる．

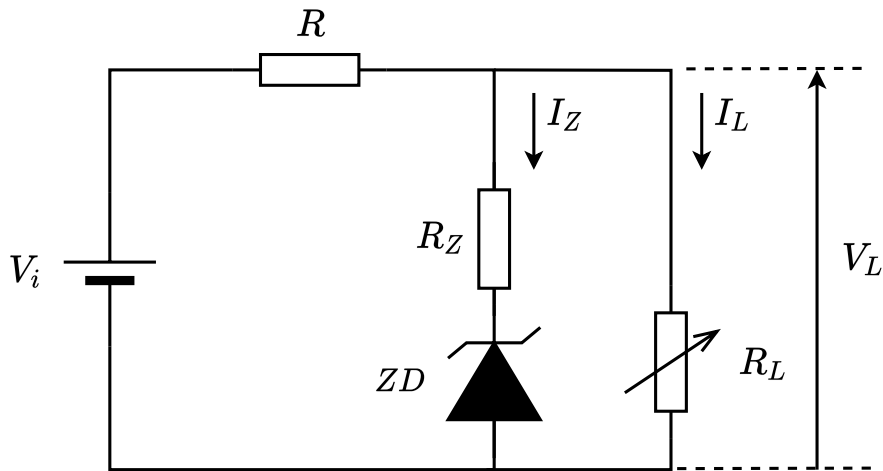


図 19: 定電圧回路の等価回路

- b) $I_Z - R_L$ 特性， $I_Z - R_Z$ 特性を同一グラフに重ねて描き，考察せよ．ここで，内について論じたいかを明確にしたうえで記述すること．

図 20 はダイオードに流れる電流 I_Z と可変抵抗 R_L とダイオードに流れる電流 I_Z と抵抗 R_Z の関係を，横軸が電流で縦軸が抵抗とし表したものである．ツェナーダイオードの特性から電圧 V_L の値は常に一定であるといえる．ツェナーの抵抗 R_Z と可変抵抗 R_L は並列で接続されていることから電圧の値は同じであるといえる．ツェナーの抵抗はオームの法則より，式 (2) で求められる．

$$R_Z = \frac{V_L}{I_Z} \quad (2)$$

この式から，ツェナーの抵抗 R_Z とダイオードに流れる電流 I_Z は反比例であるとわかる．また，合成抵抗 R_A は式 (3) で表され，一定であることが分かる．

$$R_A = \frac{V_L}{\frac{V_i}{R}} \quad (3)$$

加えて，並列接続の合成抵抗は各抵抗の逆数の和となる．合成抵抗 R_A の逆数は式 (4) となる．

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{1}{\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_Z}} \\ &= \frac{R_L * R_Z}{R_L + R_Z} \\ \frac{1}{R_A} &= \frac{R_L + R_Z}{R_L * R_Z} \\ &= \frac{R_L}{R_L * R_Z} + \frac{R_Z}{R_L * R_Z} \end{aligned} \quad (4)$$

R_A は一定であることがわかっているのので式 (3) より, R_L の値は R_Z の値が大きくなると小さく、小さくなると大きくなる。よって、ツェナーの抵抗 R_Z とダイオードに流れる電流 I_Z は反比例であることから、可変抵抗 R_L とダイオードに流れる電流 I_Z のも反比例の関係であると考えられる。図 21 をみるとグラフは反比例のグラフのようになっていることから上記の考察はあっているといえる。

表 7: 合成抵抗

ツェナー抵抗 $R_Z[\Omega]$	可変抵抗 $R_L[\Omega]$	合成抵抗 $R_A[\Omega]$
3300	255.0	237.0
1655	277.0	237.0
1103	302.2	237.0
830.0	336.2	239.3
668.0	380.6	242.5
558.3	429.5	242.8
482.9	497.1	245.0
422.5	580.3	244.5
375.6	697.0	244.0
339.0	874.8	244.3
308.2	1210	245.7

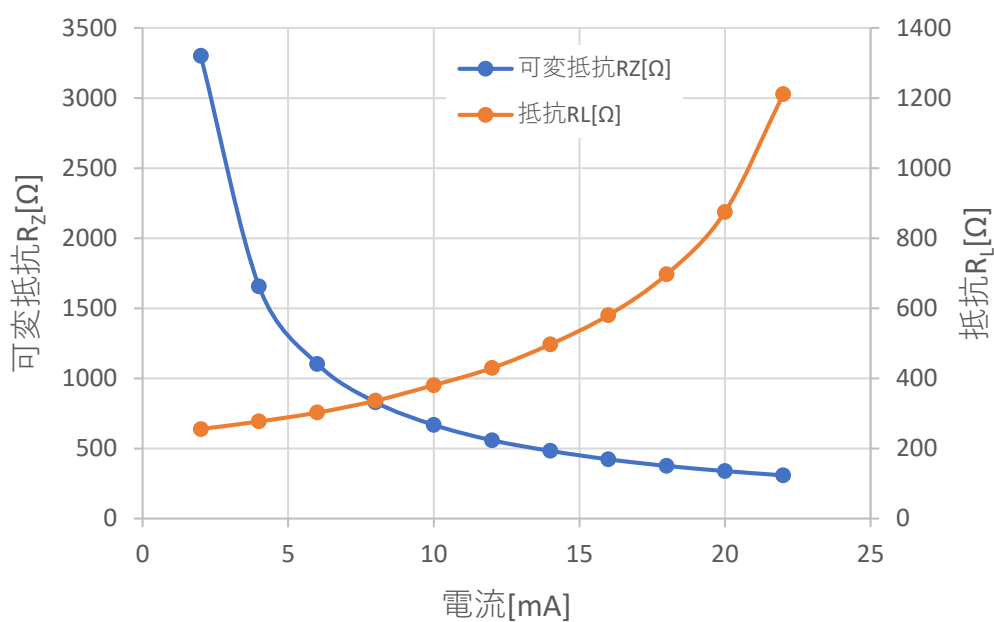


図 20: ダイオードに流れる電流 I_Z と可変抵抗 R_L とダイオードに流れる電流 I_Z と抵抗 R_Z の関係

5 太陽電池の発電特性

5.1 使用器具

太陽電池の特性実験の使用器具を以下の表 8 に示す。

表 8: 太陽電池の測定実験の使用器具

使用器具名	製造元	型番	製造番号 (管理番号)	備考
デジタルマルチメータ	OWON	B35	B35158414	電流
デジタルマルチメータ	OWON	B35T+	B35T+20210545	電圧
屋外用作業灯	HATAYA	RY-500 型	18KP03223	-
屋外用作業灯	HATAYA	RY-500 型	08AQ03697	-
扇風機	シーネット	CCM101BK	-	-
可変抵抗	TOKUSHU DENKI KOGYOSHO	D-5	3162	-
照度計	Zhangzhou WeiHua Electronic Co.Ltd.	LX-1010B	T428585	-
温度計	KKmon	TL-TK04	202019031	-
太陽光パネル	SUNYO	SY-M5W	8YM156211200520160211423	-

5.2 実験方法

- 図 21 に示した太陽電池の発電特性の測定回路をノートに描き、その通りに結線した。
- 太陽電池はライトの光が均等にあたるように配置した。位置が決まったら紙テープで位置に印をつけた。
- 初めにライトを 1 つ点灯させ、照度を測定した。
- 太陽電池を扇風機と濡れ布巾、ライトを用いて温度調整をおこない、目標温度を保てたら I_V 特性を測定した。このとき、可変抵抗の値をさせながら電圧 V と電流 I を記録した。
- 電流 I と電圧 V の測定結果をグラフを描き、教員のチェックを受けた。
- ライトを 2 つにして、照度が異なる条件で (iv) から (v) の手順を再度行った。
- 太陽電池の温度が 30 °C でライトが 1 つのときと 2 つのとき、温度が 50 °C でライトが 1 つのときと 2 つのときの 4 条件で測定を行った。

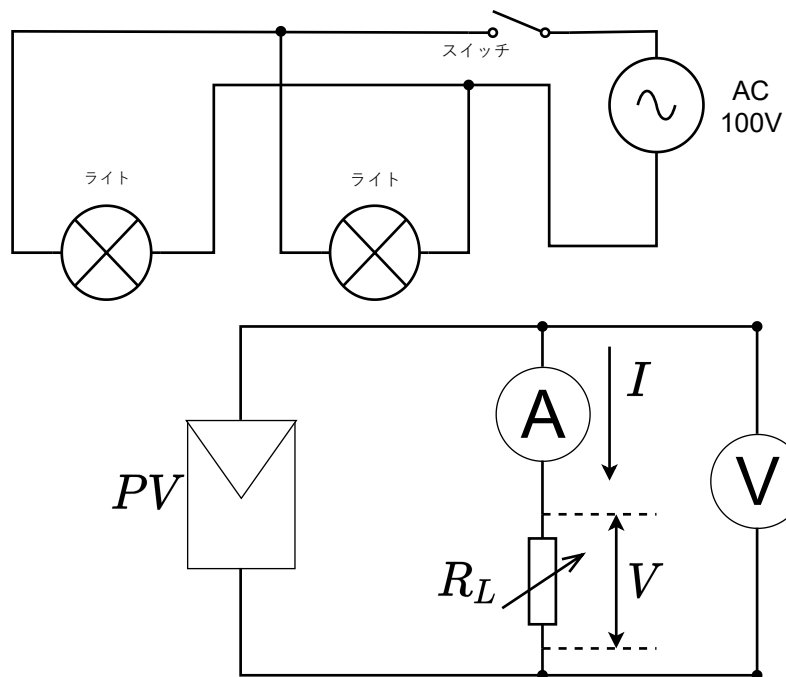


図 21: 太陽電池の発電特性の測定回路

5.3 結果

図 22 は太陽電池の電流と電圧の関係をライト 1 個 30 °C と 50 °C，ライト 2 個 30 °C と 50 °C のときそれぞれを 1 つのグラフにまとめて示したものである．また，表 9 はライト 1 個 30 °C のときの電圧と電流の関係を，表 10 はライト 1 個 50 °C のときの電圧と電流の関係を，表 11 はライト 2 個 30 °C のときの電圧と電流の関係を，表 12 はライト 2 個 50 °C のときの電圧と電流の関係を表に示したものである．この図 22 から，ライト 1 個のときは温度にかかわらず 0 V のときの電流の値は約 150 mA，ライト 2 個のときは温度にかかわらず 0 V のときの電流の値は約 250 mA であることが分かる．よってライトの数が多いとき，つまり照度が高いときに電流の流れる量は多くなるとわかる．また，温度が 30 °C のとき，ライトの数にかかわらず約 18V まで電流の値が一定で，温度が 50 °C のとき，ライトの数にかかわらず約 16 V まで電流の値が一定であることが分かる．よって，温度が高くなると最適動作電圧は小さくなること分かる．また，このときの照度はライト 1 個のときは 15940 lux，ライト 2 個のときは 23500 lux である．

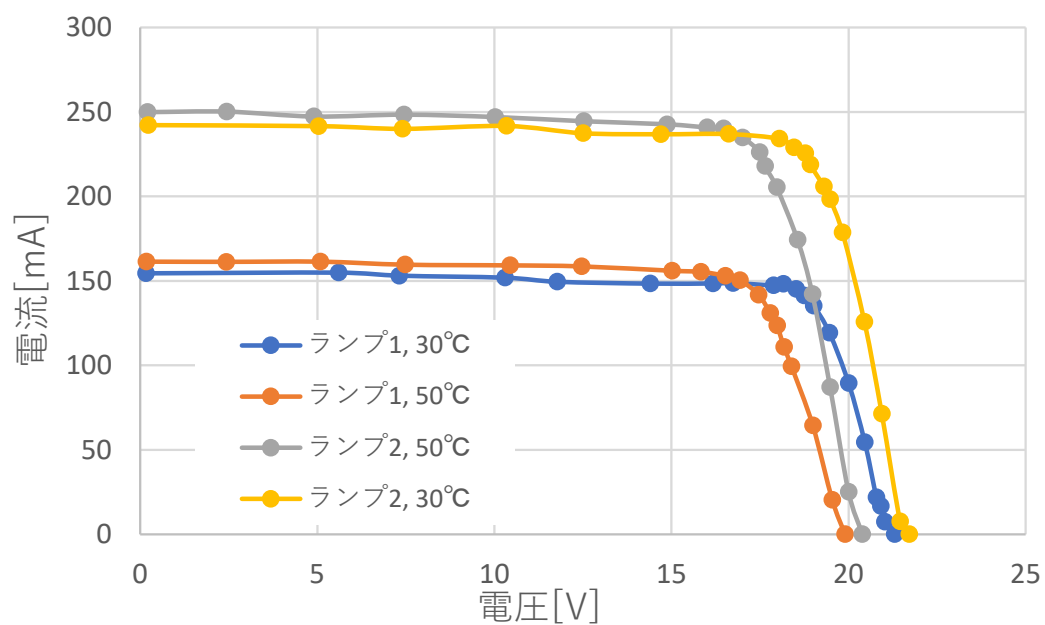


図 22: 太陽電池の電流と電圧の関係

表 9: ライト 1 個 30 °Cの時の
電圧と電流の関係

電圧 V [V]	電流 A [mA]
0.159	154.5
5.599	154.9
7.310	153.1
10.30	151.9
11.77	149.5
14.40	148.4
16.17	148.5
16.74	148.7
17.88	147.4
18.16	148.2
18.52	145.2
18.75	141.4
19.02	135.2
19.46	119.3
20.00	89.60
20.46	54.48
20.79	21.81
20.91	16.78
21.02	7.420
21.30	0.000

表 10: ライト 1 個で 50 °Cのときの
電圧と電流の関係

電圧 V [V]	電流 I[mA]
0.1757	161.4
2.433	161.3
5.091	161.4
7.480	159.6
10.44	159.2
12.46	158.6
15.02	156.0
15.83	155.4
16.52	153.0
16.93	150.5
17.46	141.8
17.79	130.9
17.98	123.6
18.18	110.8
18.39	99.40
18.99	64.50
19.54	20.49
19.90	0.000

表 11: ライト 2 個で 30 °C のときの
電圧と電流の関係

電圧 V [V]	電流 I [mA]
0.2272	242.2
5.038	241.6
7.410	240.0
10.34	241.7
12.50	237.4
14.70	236.8
16.61	236.9
18.05	234.1
18.46	229.1
18.78	225.5
18.92	218.8
19.30	206.0
19.48	198.3
19.83	178.6
20.45	125.7
20.94	71.30
21.46	7.580
21.71	0.000

表 12: ライト 2 個で 50 °C のときの
電圧と電流の関係

電圧 V [V]	電流 I [mA]
0.2077	249.9
2.444	250.2
4.903	247.3
7.450	248.4
10.02	247.0
12.53	244.5
14.87	242.7
16.01	240.8
16.47	240.2
17.01	234.9
17.49	226.3
17.64	217.9
17.97	205.4
18.56	174.3
18.98	142.2
19.48	87.10
20.00	25.14
20.39	0.000

5.4 考察

- 1) 各条件下の電流-電圧の測定結果から電力を算出し、 $P-V$ カーブを描きなさい。また、最大電力点を抽出して表にまとめ、条件の変化と最大電力点について考察せよ。

図 23 は太陽電池の電力と電圧の関係を図に示したものである。また、表 13 はライトの個数と温度を変化させたときの最大電力 P_{max} と最適動作電圧 V_{pm} の関係を表にしたものである。この図と表から最適動作電圧はライトの数、つまり照度に関わらず温度によって決まり、温度が大きくなると最適動作電圧は小さくなるのが分かる。このことから、ライトの数が変化するとき変わるのは最適動作電圧であり、最大電力は変化していないことが分かる。

図 24 は太陽電池の等価回路である [3]。この回路図から太陽電池は直流電流源とダイオードと抵抗を並列でつないだものをさらに抵抗と直列につなげたものと等しいことがわかる。このとき最大の電圧が V_{OC} であることから出力電圧は V_{OC} となる。

図 23 より、ランプの数が同数の時、温度が高いと最大電力点が下がっている。図 22 より、ランプが同数の時、温度が高いと出力電流が低下し始める電圧が小さい。これより、ランプが同数の時、最大電力点は出力電流に依存していて、出力電流が低下し始めるのが早いと、最大電力点も低下すると考えられる。原理より、太陽電池の電流と電圧の関係は、ダイオードの入力特性のグラフの縦軸を反転させたものである。よって電流が低下し始めている電圧点は立ち上がり電圧に相当する。温度が上がること熱励起が起こる [5] ため、電流が流れやすくなり立ち上がり電圧が低下する。温度が上がると電圧が減少する。 $W = V * I$ より、電圧 V が減少すると電力も減少する。これにより、温度が高い時の方が低い時に比べて 最大電力点は小さくなったと考えられる。

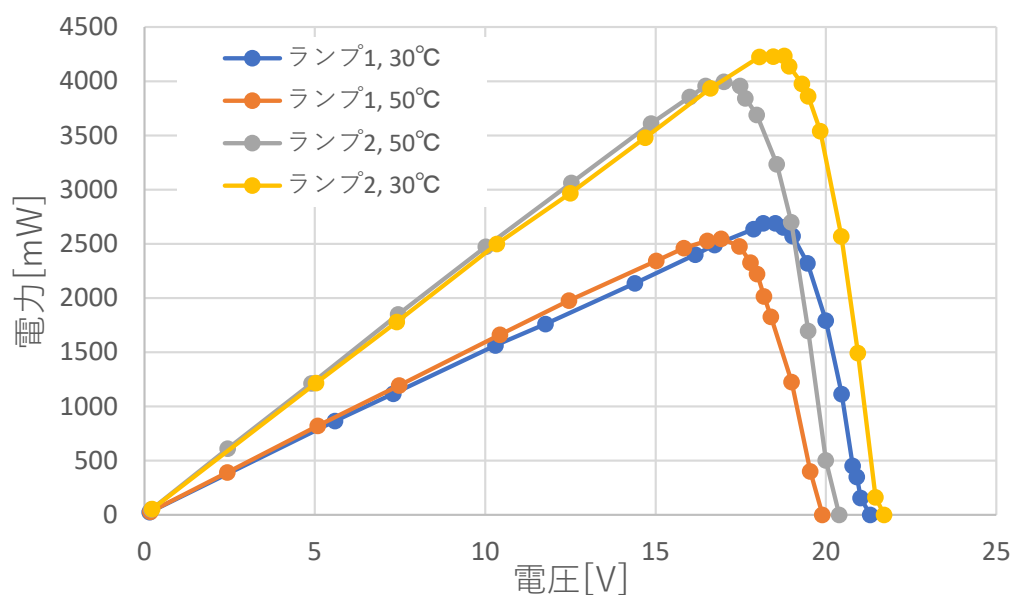


図 23: 太陽電池の電圧と電力の関係

表 13: 最適動作電圧 V_{pm} と最大電力 P_{max} と

-	最適動作電圧 V_{pm} [V]	最大電力 P_{max} [mW]
ライト 1 個 30 °C	18.16	2691
ライト 2 個 30 °C	18.78	4235
ライト 1 個 50 °C	16.93	2548
ライト 2 個 50 °C	17.01	3996

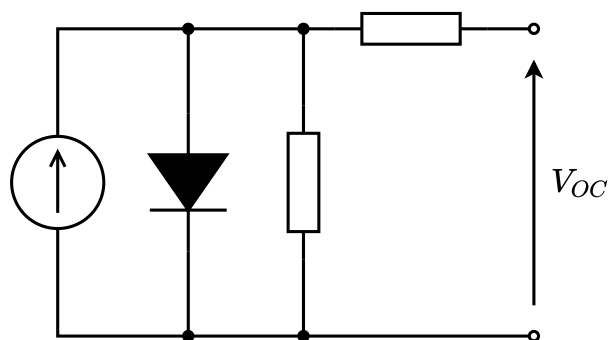


図 24: 太陽電池の等価回路

- 2) MPPT 制御はなぜ必要か説明せよ。また、そのアルゴリズムには「山登り法」と「電圧追従法」がある。これらの特徴を調査し、比較して説明せよ。

「山登り法」は電圧を取得し、電圧に微小変動を加え電力が大きくなる側に調整を行う作業を繰り返すことでできる [5]。メリットは、 $I-V$ 特性を知る必要なく最大電力点を確実に追える点である。デメリットは、処理量が膨大であり、MPPT 効率を低下させてしまう場合がある点である。「電圧追従法」は、開放電圧を取得し、最大電圧点は開放電圧の 7~8 割の値に設定する。メリットは、処理量が少ない点である。デメリットは、あらかじめ $I-V$ 特性を知っている必要がある点と、最大電力の確実性が低いという点である。一般的に使われているのは山登り法である。山登り法では、最大電力点を確実に追えるからであると考えられる。電圧と電流を適切に処理するためには MPPT 制御が必要であり、最大電力点を追うために山登り法が使われていると考えられる。

6 結論

ダイオードの原理を知り、実験により整流特性を理解し、ダイオードを使用できる。ツェナーダイオードを使用できる。太陽電池の発電特性を知り、太陽電池を使用できる。このことから目的は達成できたとと言える。

7 参考文献

参考文献

- [1] 高木茂孝, 電子回路, 実教出版社, 2022.
- [2] 太陽光発電の仕組み, 太陽電池の等価回路, http://www.solartech.jp/module_char/equivalent-circuit.html, (参考:2022-05-23)
- [3] わかりやすい高校物理の部屋, 抵抗率, <http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/p/elec/dennryuu/teikouritu.html#:~:text=%E6%8A%B5%E6%8A%97%E7%8E%87%E3%81%AF%E6%B8%A9%E5%BA%A6%E3%81%AB%E3%82%88%E3%81%A3%E3%81%A6,%E3%82%92%E9%82%AA%E9%AD%94%E3%81%99%E3%82%8B%E3%81%AE%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82>, (参考:2022-05-23)
- [4] 協栄エレクトロニクス, “太陽光発電と制御技術”, <http://www.kyoei-ele.com/products/index.php/prod/info/89/file/2.pdf>, (参考:2021-06-01)
- [5] 太田裕道, 電子デバイス工学 (3), <http://functfilm.es.hokudai.ac.jp/wp-content/uploads/2017/02/device3.pdf>, (参考:2022-05-26)