

・4日目5日目6日目

・実験課題

P型のショットキーダイオードとN型のショットキーダイオードを作成して、電流電圧特性を測定すること。また、ダイオードの温度は常温、0℃付近の温度、液体窒素にダイオードを沈めた時の温度と3種類行う。

・目的

ダイオードの原理について学ぶ、またダイオード特性の温度変化について確認する。

・使用器具

真空蒸着装置、電離真空計、p型シリコンウエハー、n型シリコンウエハー

アルミニウム線(3.0cm)×2本、電源(KENWOOD PR18-5A)

テスター(PC500-RS-232C×2、GDM-8341)、液体窒素、熱電対

・実験方法

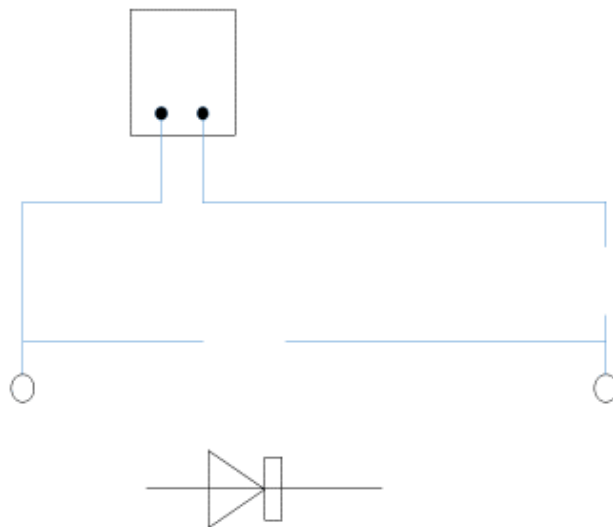


図 4-1 ダイオードの電気電圧特性を測定する 2 端子回路

p 型のシリコンウエハーと n 型シリコンウエハーをダイヤモンドカッターで切り出した。P 型は約 1.0cm のひし形で n 型は約 1.0cm の正方形に切り出した。

ドラフトのある部屋に移動して、シリコン基板の鏡になっていない面をフッ化水素で洗い流し、表面に形成されている酸化膜を除去した。その面に一部穴を開けたアルミホイルを被せて、その穴の部分のみにアルミニウム(3.0cm)を2日目の実験と同様に蒸着させた。なお、蒸着させる際にタングステン線に電流を流し、アルミニウムが溶けて、最初の1,2秒ほどは表面の酸化したアルミニウムが蒸着する可能性を考えた。従って、ガラスベルジャー内の移動させることができる金属板を蒸着が始まって1秒はシリコンウエハーの上に覆うようにした。1秒後は金属板を移動させて、アルミニウムを蒸着させた。蒸着終了後10分ほど時間を置いて、ガラスベルジャーを開放した。シリコン基板を500℃の電気炉で10分間置いた。もう1度ドラフトのある部屋に移動して、次はシリコンウエハーの鏡になっている面をフッ化水素で洗い、同様の操作で鏡になっている面にアルミニウムを蒸着させた。

図 2-1 のようにダイオードを二端子回路に接続して、常温で電気電圧特性を測定した。なお、流れる電流が1Aを超えないように注意した。

次に液体窒素を用意して、熱電対の電圧が0mV付近になる高さに回路の高さを合わせて電流電圧特性を測定した。更に、回路を液体窒素の中に入れて同様に電流電圧特性を測定した。

#### ・実験結果

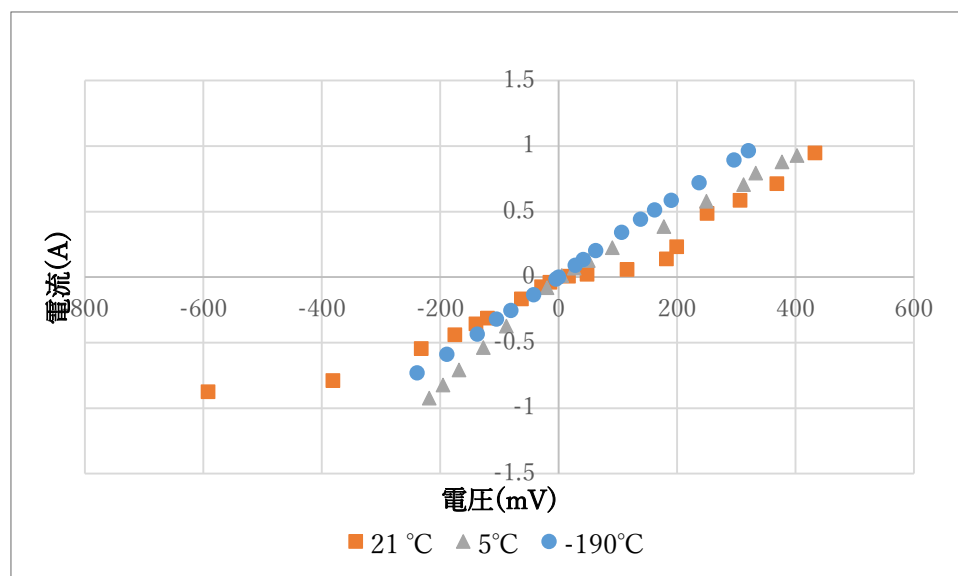


図 4-2 n 型半導体の V-I グラフ

n 型半導体はオーミック特性が得られた。

電流、電圧が正の値の範囲で縦軸を対数としたグラフは図 4-3 のようになった。

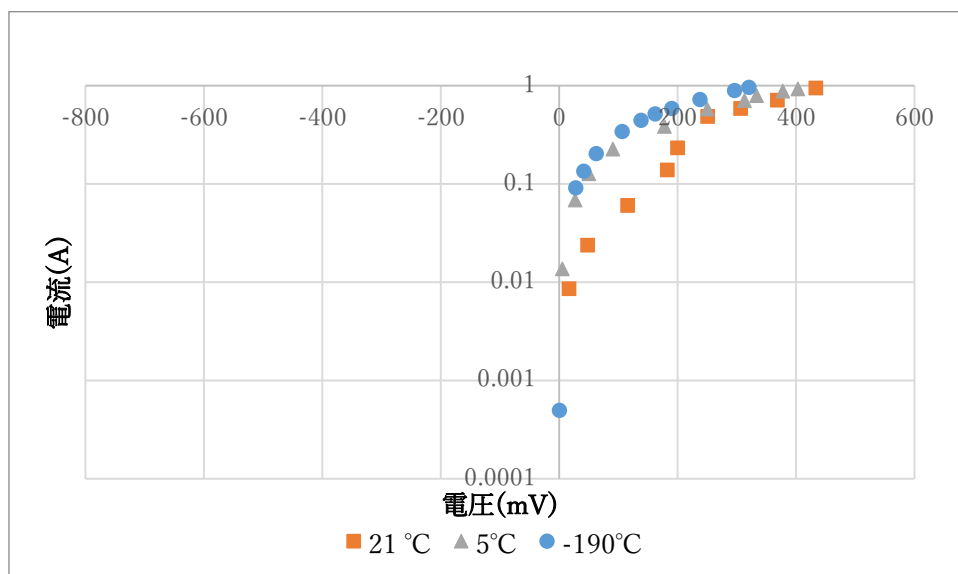


図 4-3 n 型半導体の縦軸が対数の I-V グラフ

図 4-3 から対数にしたときに  $A=k \cdot \log V$  のグラフ (A;電流、V;電圧、k;定数) になっていると考えられるので、確かに図 4-2 のグラフはオーミック特性であると考えた。

また、電流が-1.1(A)~0(A)の範囲でのグラフは図 4-4 のようになった。

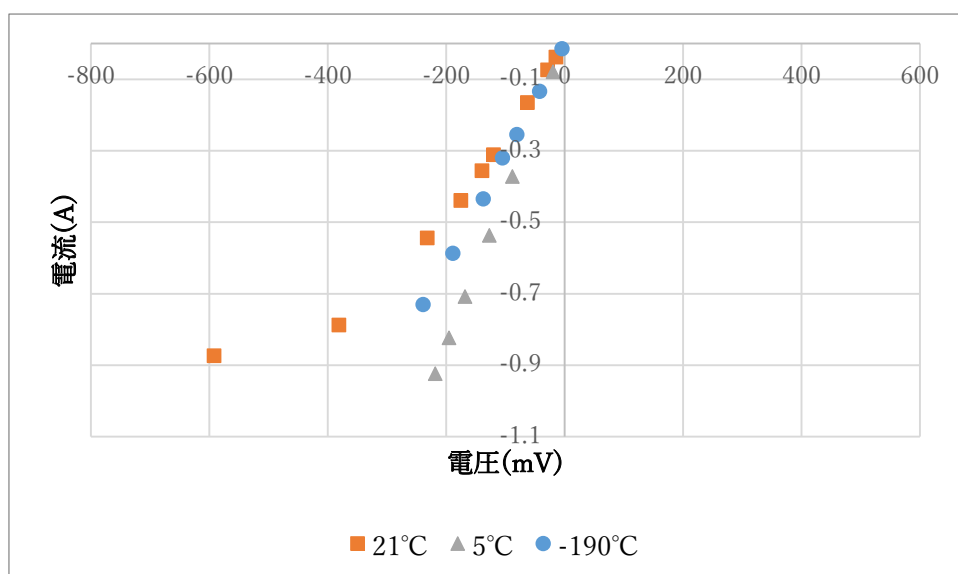


図 4-4 n 型半導体の縦軸が-1.1(A)~0(A)の範囲での I-V グラフ

図 4-4 から電圧が-200(mV)~0(mV)の範囲ではどの温度でもオーミック特性が見られるが21℃の時のみ-600(mV)~-200(mV)の範囲では電流大きくなっていることが分かった。

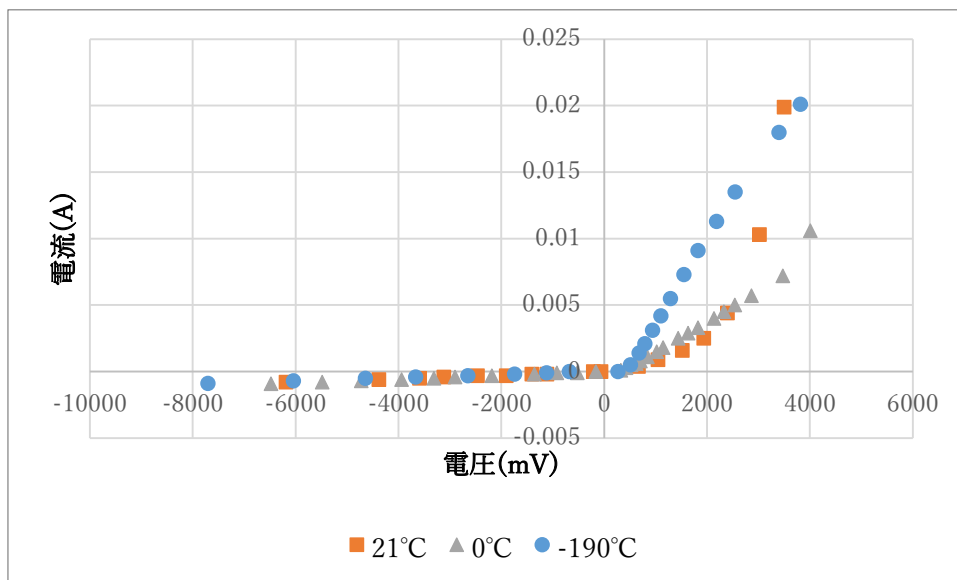


図 4-5 p 型半導体の V-I グラフ

図 4-5 から p 型半導体はショットキー特性が得られた。

同様に電流、電圧が正の値の範囲で縦軸を対数としたグラフは図 4-6 のようになった。

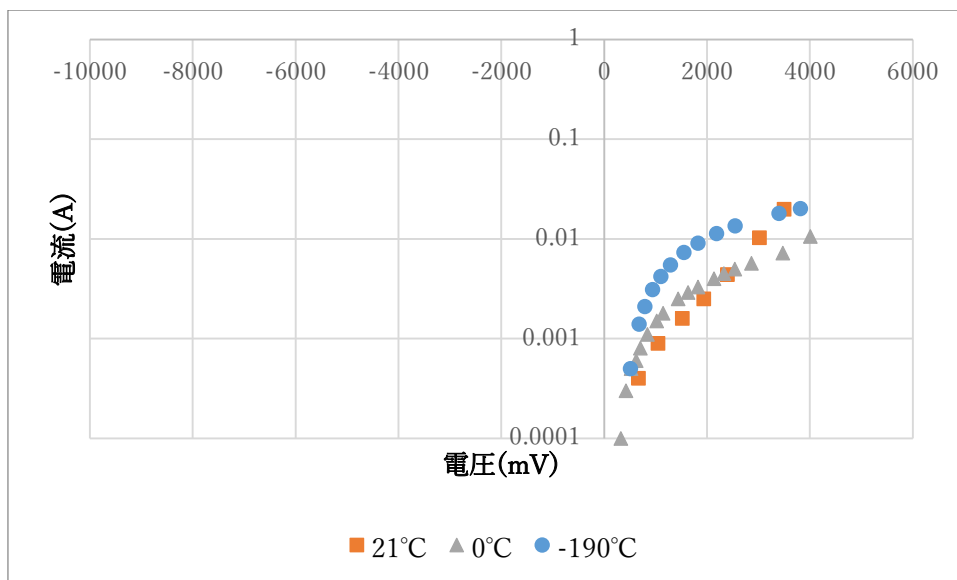


図 4-6 p 型半導体の縦軸が対数の I-V グラフ

図 4-6 から温度が 21℃の時は直線になっていて、0℃と-190℃の時は対数グラフになっていることから、ショットキー特性とオーミック特性が両方見られると考えた。

また、電流を-0.001(A)~0(A)の範囲でのグラフは図 4-7 のようになった。

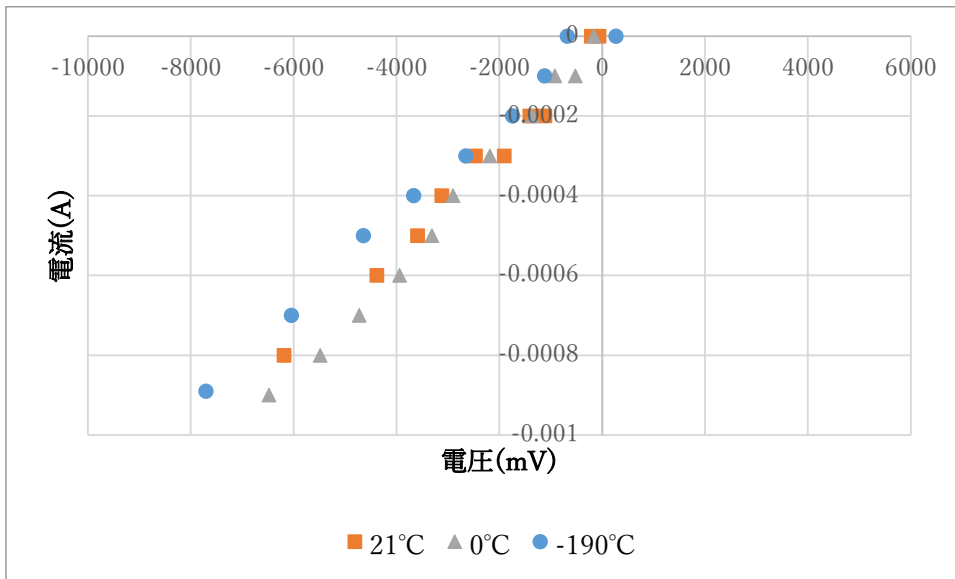


図 4-7 p 型半導体の縦軸が-0.001(A)~0(A)の範囲での I-V グラフ

図 4-7 から拡大してみると電流が負の範囲にはオーミック特性が見られた。

#### ・考察

##### ( i ) n 型半導体

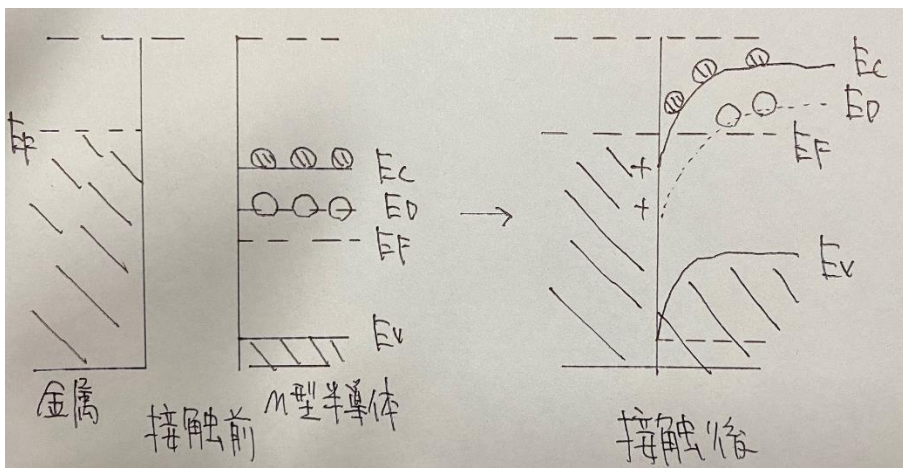


図 4-8 今回の実験での n 型半導体と金属の接触

実験結果から作成した n 型半導体は図 4-2 からオーミック特性を示すということが分かった。n 型半導体と金属との接触において、半導体の仕事関数が金属の仕事関数より大きい時にオーミック特性を示すので、n 型半導体の仕事関数はアルミニウムのそれよりも大きいと考えられる。

また、仕事関数の大小でフェルミ準位の大きさも分かる。フェルミ準位が大きくなると仕事関数が小さくなるので、アルミニウムのフェルミ準位の方が n 型半導体に比べて大きいと考えられる。アルミニウムと n 型半導体を接触させることによってフェルミ準位が同じとなる。その時に金属から自由電子が半導体に移動するので半導体表面は負電荷が生じて、金属表面は正電荷が生じる。この時に図 4-8 のようにエネルギー障壁が生じないので外部からの印加電圧の正負に依存せずに電流が流れることとなり、整流性を示すことはないと考えられる。従って今回作成した n 型半導体は欠陥が少なく、正確な特性を示したと考えた。次に温度依存性について考えてみる。図 4-3 から 21°C の時に抵抗の値が一番大きく、次に 5°C、-193°C と温度が小さくなるに従って抵抗の値が小さくなることが分かった。

n 型半導体の場合、温度  $T$  が極低温に近づくほど伝導体に励起される自由電子は n 型半導体内の不純物に影響を受ける。つまり、不純物の原子が自由電子を多く束縛することとなるので、電子の移動量が小さくなることが分かる。つまり、キャリア密度が小さくなることで導電率は小さくなる。つまり抵抗値は大きくなる。今回の実験では理論とは逆の結果が得られた。原因としては、シリコンウェハーをフッ化水素で洗浄する際に酸化膜が全て落としていなかったことや、作業中に空気中の酸素とシリコンウェハーが反応してしまった事がまず考えられる。金属の場合には温度が上昇することによって格子散乱が起こり電子の移動量が減少するので抵抗率が大きくなる。よって、作成した n 型半導体は金属としての性質が大きいと考える。

#### (ii) p 型半導体

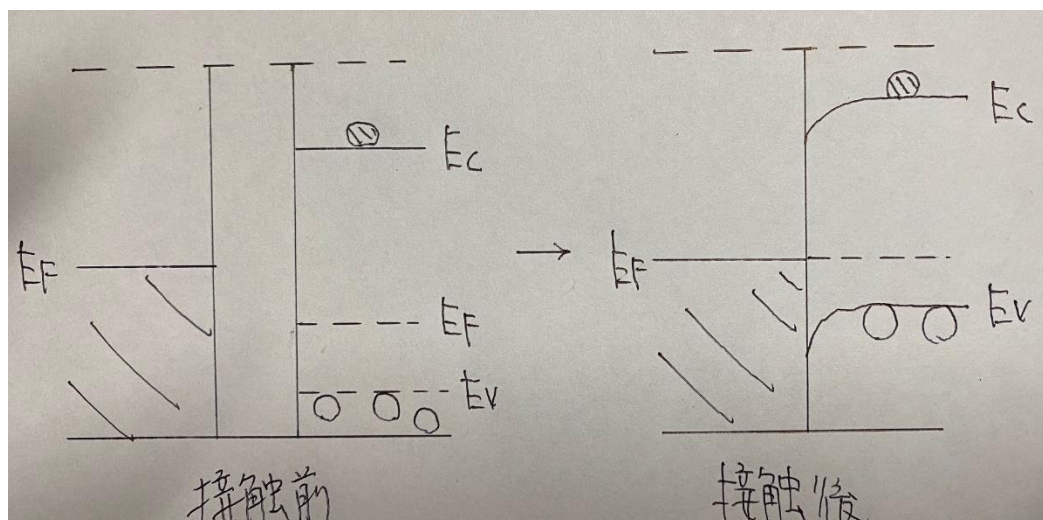


図 4-9 今回の実験での p 型半導体と金属の接触

今回の実験で作成した p 型半導体は図 4-5 からショットキー特性を示していることが分かった。p 型半導体と金属の接触については図 4-9 の様になる。

アルミニウムの仕事関数は 4.1eV で p 型半導体のシリコンウェハーの仕事関数は 4.8eV があるので、半導体の仕事関数の方が大きい。従って、フェルミ準位は金属の方が大きいと分かる。p 型半導体とアルミニウムを接触させると n 型半導体の時と同様に金属側の電子が半導体側に移動する。

移動してきた電子が p 型半導体内の正孔に入り込み、電氣的に中性になることが分かる。半導体は負の電荷を持ち、金属は正の電荷を持つことになるのでショットキー障壁が生じる。ショットキー障壁を持つ真性半導体に正の電圧を印加すると

$$J = J_0 \left\{ \exp \left( \frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right\} \quad \text{---(c1)}$$

(J:電流密度、 $k_B$ :ボルツマン定数)の式に従って電流が流れるので、電流に対して対数を取りグラフをプロットすると直線になると考えられる。図 4-6 から 21°Cの時にはグラフは直線的になっているが、0°Cと-190°Cの時には対数関数となっている事が分かる。つまり、温度を下げると作成した半導体は金属としての振る舞いの影響が大きくなっているという事が言える。また、負の電圧を印加した時には真性半導体の場合は漏れ電流のみが測定できる。しかし、図 4-7 から負の電圧を印加した時には明らかにオーミック特性を持っていて、その抵抗値は-190°Cの時が一番大きく、次に 21°C、一番小さいのは 0°Cとなっている。以上の結果から 21°Cの時は半導体としての性質を優位に持つが、温度を小さくした時には明らかに金属としての性質が優位となることが分かった。

以上の結果から今回作成した p 型半導体の場合は以下の回路になっているのではないかと推定した。

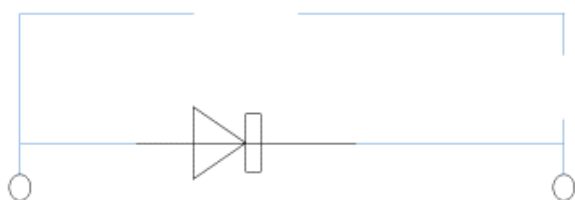


図 4-10 今回作成した p 型半導体の回路モデル

図 4-10 のようにダイオードと抵抗が並列回路になっていると推定した。このように考えると負の電圧を印加した時に I-V グラフが直線になり、オーミック特性を示すと考えた。

今回の実験では片面を 500°C の電気炉の中で 10 分間入れた。この操作で金属と半導体を接触させる。しかし、一部が完全に反応しなかった場合、その部分は金属として考えられて固有の抵抗値を持つと考えられる。また、シリコンウエハーの表面の一部に欠陥がある、またはフッ化水素により除去しきれなかった酸化膜があった場合にも同様の結果が得られるのではないかと考えた。

次に、温度依存性について考える。p 型半導体は温度が小さくなると、正孔の密度が小さくなり温度が大きくなるにつれて正孔の密度が大きくなると考えられる。図 4-10 のような並列回路の場合では温度が 21°C の時はダイオードの特性を示すが、温度が小さくなると抵抗の影響が大きくなると考えた。よって、図 4-6 のような 21°C の時は対数グラフが直線になり、温度を下げて 0°C と -190°C の時は対数関数になったと考えた。

#### ・参考文献

林正彦編著、「理科年表」、丸善出版株式会社、平成 25 年 — (参考文献 1)

C.kittel 著、「固体物理学入門」、丸善出版株式会社、2005 年 — (参考文献 2)