

物理学実験 I
課題 7
ホール効果測定

実験者番号 72
学籍番号 B9SB2032 木村佑斗

2022年2月1日

目次

1	目的	3
2	原理	3
3	実験1 オーミック電極端子の作製と評価	3
3.1	実験方法	3
3.2	結果	4
3.3	考察	4
4	実験2 キャリア密度、移動度の室温測定	5
4.1	実験方法	5
4.2	結果	5
4.3	考察	5
5	実験3 キャリア密度、移動度の温度依存性の測定	6
5.1	実験方法	6
5.2	結果	7
5.3	考察	10
6	結論	11

1 目的

ホール効果測定によって半導体の機能において重要なパラメータであるキャリア密度、キャリアの移動度を計算で求めることができる。本実験では P 型か N 型か不明の半導体をホール効果測定を利用して P か N かを判断しその試料のキャリア密度と移動度を求めることが目的である。さらに温度変化による半導体のそれらのパラメータがどのように変化するかも調べる。

2 原理

半導体には電子が移動する N 型、正孔が移動する P 型がある。本実験で用いた GaAs の電子・正孔の有効質量は、電子 $m_n = 0.06m_e$ 、正孔 $m_p = 0.5m_e$ である。 m_e は真空中の電子の質量である。ホール効果測定によって、その半導体のキャリアの種類とキャリア密度と移動度を決定できる。物質中の電子のエネルギー状態には高エネルギー側の伝導帯と低エネルギー側の価電子帯があり、両者にはエネルギー的に隔たりがある。これをバンドギャップという。良導体である金属は、価電子帯には電子が埋め尽くされており、伝導帯にも電子が存在する。この伝導帯にある電子が電流の正体である（自由電子）。Si などの通常の半導体では、伝導帯には電子が存在しない。電圧をかけることで価電子帯の電子が励起され、伝導帯に移動して電流が生じる。このような真性半導体に微量の不純物を加えると N 型半導体・P 型半導体となる。Si などに 5 価元素である P などを加えると電子が 1 個余分に生じるので N 型になる。3 価元素である B や Al を加えると正孔ができるので P 型になる。N 型では加えた不純物によって伝導帯のすぐ下にドナー準位と呼ばれるエネルギー準位が形成される。ドナー準位にある電子が励起されて伝導帯に移動し電流が生じる。P 型では加えた不純物によって価電子帯のすぐ上にアクセプタ準位と呼ばれるエネルギー準位ができる。価電子帯にある電子がアクセプタ準位に励起されて価電子帯に正孔ができて電流が生じる。不導体はバンドギャップが大きすぎて価電子帯にある電子を励起することが難しいので電流が生じない。

キャリア密度 n と移動度 μ はそれぞれ

$$\rho \propto e^{-\frac{1}{T}}, \quad \mu \propto \frac{1}{T} e^{\frac{1}{T}} \quad (1)$$

という温度依存性がある。

3 実験 1 オーミック電極端子の作製と評価

3.1 実験方法

1 辺が 1.5cm ほどの正方形のインジウム In 板の 4 角に直径 3mm ほどの GaAs を押し付けて固定し、簡易熱処理装置でフォーミングガス中で約 250 °C で In と GaAs を接合した。その後金線とはんだで試料を電極端子とつないだ。各端子間の導通を確認した後、図 1 のように回路を組み、二端子測定をしてオーミック特性 (I-V 特性が線形) になっていることを確かめた。その際、AB 間と DC 間の 2 通りを調べた。

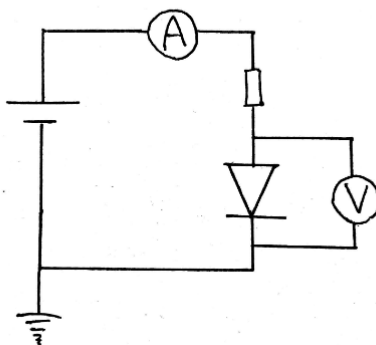


図 1 組んだ回路

3.2 結果

以下に測定結果を示す。

表1 AB間のI-V測定結果

電源 mV	抵抗器 k Ω	電流計 mA	電圧計 mV
1500	1.005	1.51	2.22
	0.615	2.48	3.64
	0.299	5.04	7.38
	0.1	14.79	21.6

表2 CD間のI-V測定結果

電源 mV	抵抗器 k Ω	電流計 mA	電圧計 mV
1500	1.005	1.52	2.73
	0.615	2.49	4.35
	0.299	5.04	8.81
	0.1	14.75	25.7

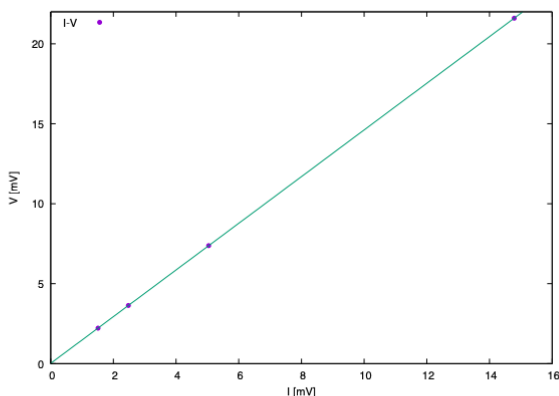


図2 AB間のI-V特性

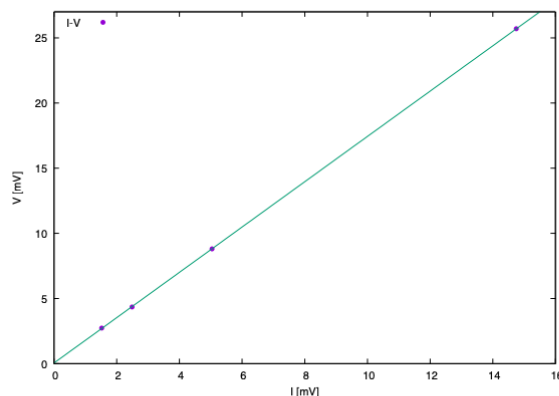


図3 CD間のI-V特性

このようにAB間,CD間どちらもオーミック特性となっていた。

3.3 考察

まず熱処理方法について述べる。一般に空気中には酸素が含まれており、その中で熱すると物質は参加してしまう。金属や半導体は酸化することで抵抗率が変化するなど、性質が変化してしまう。したがって物質と反応しづらい希ガスであるアルゴンを満たし、さらに還元剤である水素を少量含んだフォーミングガス中で熱処理をした。

次に、I-V特性の測定において、4つの端子が全てオーミック特性であることを調べる際の必要十分な実験の通り数について述べる。仮に全ての端子がうまく接続できていたならばAB・CD間のどちらもオーミック特性を示す。仮にAまたはBがうまく接続できていなければAB測定時にオーミック特性を示さない。すなわち1つでも接続がうまくできていなければ必ず2回の測定のうち少なくとも1回はオーミック特性を示さない。したがって「4端子全て正常」の必要十分条件は「2通りの測定（AB間とCD間）どちらもオーミック特性」である。今回の実験ではこの2通りでどちらもオーミック特性を示したので4つの端子は全て正常に接続できたことになる。

次に実験1の回路を図1のようにした理由を述べる。試料がオーミック特性かどうかを調べるには試料に流れる電流を変えて試料にかかる電圧を測るか、試料にかかる電圧を変えて電流を測るかである。図1の回路は意図は後者で

ある。電源電圧一定で抵抗と試料を直列につなぐ。これで抵抗を変えると試料にかかる電圧が変化するので、結果的に電流も変化する。この場合、試料と抵抗を並列にしても意味がない。なぜなら、電流は変化するが、試料にかかる電圧は常に電源電圧と一致してしまうからである。

また、本実験では試料がオーミック特性であることが必要条件である。オーミック特性であることは、試料の抵抗がその温度で一定であるということ、すなわち、試料にかかる電圧や電流によって抵抗は変化しない。キャリア密度や移動度は試料の面抵抗率に依存し、面抵抗率はもちろん抵抗値に依存する（試料の面積は変化しないので）。つまり、オーミック特性でないと、何が抵抗の真の値か決定できず、正しいキャリア密度や移動度が測定できない。

4 実験2 キャリア密度、移動度の室温測定

4.1 実験方法

図4の向きに試料に磁場をかけた。磁場無しの場合と磁場 0.12[T] の場合とで電流と電圧を測定した。実験に用いた回路は図1と同じである。ただし実験1では2端子法だったがこの実験2では4端子法で測定した。すなわち、AB間の電流を測るときはDC間の電圧を測定するという具合である。抵抗は100Ωを使用した。

4.2 結果

以下に得られた結果を示す。

表3 電源電圧 3.3[V]、室温での4端子法測定結果

磁場なし				磁場あり			
I,V	100 Ω			I,V	100 Ω		
	I[mA]	V[mV]	R[Ω]		I[mA]	V[mV]	R[Ω]
AC,DB	33.22	0.009	0.0003	AC,DB	33.15	-0.039	-0.0012
AD,BC	33.16	0.625	0.0189	AD,BC	33.27	0.621	0.0187
BC,AD	33.21	0.629	0.0189	BC,AD	33.22	0.623	0.0186
BA,CD	33.18	0.631	0.0190	DC,AB	33.25	0.623	0.0187
CD,BA	33.14	0.636	0.0192	AB,DC	33.14	0.619	0.0187

4.3 考察

100Ωの抵抗を選んだ理由を述べる。100Ωは金線が切れることが無い安全な値であり、これ以上小さな抵抗を用いると金線が切れる恐れがあった。小さな抵抗を用いた方が電流と電圧の変化が見やすかったので安全な範囲での最小の抵抗である100Ωを用いたのである。

磁場無しの「AD,BC」と「BC,AD」を見てみると抵抗Rがほぼ等しい。「BA,CD」と「CD,BA」を見ても同様である。すなわち相反原理が成り立っている。相反原理が成り立つということはホール抵抗を測定するときも対角線の組み合わせ1つだけで十分ということになる*1。

ホール抵抗とはホール効果によって生じるものである。つまり磁場をかけないときの抵抗はバックグラウンドである。したがってホール抵抗を求めるときは磁場ありの抵抗R(B)からB(B=0)を引かねばならない。テキストに書かれた式に従って面抵抗率 ρ_r 、キャリア密度 n_r 、移動度 μ を求める。磁場無しにおいて、

$$R_{AD,BC} = 0.0189, \quad R_{BA,CD} = 0.0190$$

であるから、f値は

$$f\left(\frac{R_{BA,CD}}{R_{AD,BC}}\right) = f(1.01) = 1.0000$$

*1 対角線の組み合わせとしては電圧電流を入れ替えれば2通りある。

となるので

$$\rho_r = \frac{\pi}{2 \ln 2} (R_{AD,BC} + R_{BA,CD}) = 0.0859[\Omega]$$

となる。次にホール抵抗 ΔR からキャリア密度 n_r を求める。

$$\Delta R_{AC,DB} = |R_{AC,DB}(B) - R_{AC,DB}(B=0)| = 0.0015[\Omega]$$

したがって n_r は

$$\begin{aligned} n_r &= \frac{B}{e\Delta R} \\ &= \frac{0.12}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.0015} \\ &= 5.0 \times 10^{20} [m^{-2}] \end{aligned}$$

となる。移動度 μ は、

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{en_r\rho_r} \\ &= \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 5.0 \times 10^{20} \times 0.0859} \\ &= 0.15 [m \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}] \end{aligned}$$

となる。

最後にキャリアの種類を決定する。図4のように、A→Cの向きに電流を流した時、D→Bの向きで電圧を測ると負の値になった。すなわちBが高電位、Dが低電位である。キャリアは自由電子・正孔に関わらず図の向きに力が働くので、Dに自由電子が集まることになる。従ってキャリアは自由電子ということになり、この半導体はn型半導体ということになる。

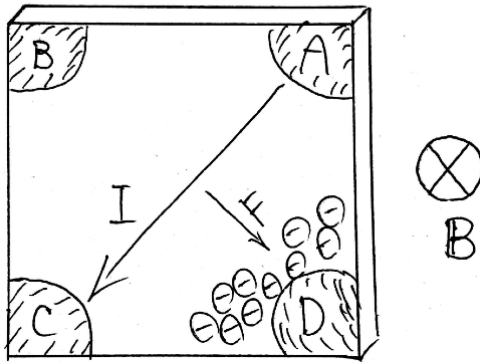


図4 磁場の方向と電流の向き、キャリアに働く力

5 実験3 キャリア密度、移動度の温度依存性の測定

5.1 実験方法

まず、与えられた試料を実験1同様の方法でオーミック端子であるかを調べた。真空引きした簡易クライオスタットに液体窒素を入れ、試料を冷却した。熱電対を電圧計につないで温度をみて、最低温度になった時から測定を開始し、10K間隔で室温まで測定を続けた。測定は実験2と同様のやり方である。実験の途中-47℃付近から温度の上昇速度がとて速くなった。(TAさんは液体窒素の追加はしない方が良いと助言をしてくれたが、温度上昇が速すぎて測定が間に合わない、と思った私は液体窒素を追加投入してしまった。そのため、-37℃付近まで上昇していたのが-57℃ほどまで低下してしまった。その後電熱線の電圧値を高めて温度を上げて-27℃まで上昇するのを待ち、再開した。)

5.2 結果

測定結果は以下の表の通り。表 4 からオーミック特性であることがわかった。なぜならあらゆる電圧、電流値で試料の抵抗値が一定だからである。

表 4 オーミック特性の確認

	電源電圧 V	抵抗器 k Ω	電流計 mA	電圧計 mV	抵抗値 Ω
A-B	3.3	1.005	3.29	8.10	2.46
		0.612	5.41	13.6	2.51
		0.299	11.0	27.2	2.48
		0.100	33.1	83.0	2.51
A-D	3.3	1.005	3.30	7.69	2.33
		0.612	5.41	12.6	2.32
		0.299	11.0	25.7	2.34
		0.100	33.1	77.6	2.34
B-C	3.3	1.005	3.30	8.50	2.58
		0.612	5.41	13.9	2.58
		0.299	11.0	28.4	2.59
		0.100	33.1	86.4	2.61

次に、温度変化に伴う測定の結果を示す。

表 5 磁場 0.12T の時の測定結果

温度 T($^{\circ}$ C)	I,V	電流 mA	電圧 mV	R(0.12T) Ω
-107	AC,BD	30.6	50.0	1.55
-97		31.4	49.6	1.49
-87		32.0	25	1.47
-77		32.7	167	1.32
-67		32.8	1080	1.16
-57		32.9	30.5	0.838
-47		33.1	22.5	0.609
-37		33.2	11.1	0.263
-27		33.3	6.22	0.163
-17		33.3	4.20	0.108
-7		33.3	3.55	0.0930
3		33.1	2.20	0.0566
13		33.3	1.71	0.0436

表 6 磁場 0T の時の測定結果

T(°C)	I,V	電流 mA	電圧 mV	R(B=0) Ω
-107	AB,DC	32.8	3.13	0.0955
	BC,AD	30.9	3.78	0.122
	AC,BD	31.1	2.549	0.0821
-97	AB,DC	32.8	3.59	0.110
	BC,AD	31.5	4.58	0.146
	AC,BD	31.6	2.83	0.0896
-87	AB,DC	32.9	4.246	0.129
	BC,AD	32.1	5.70	0.178
	AC,BD	32.1	3.3	0.103
-77	AB,DC	32.9	4.43	0.134
	BC,AD	32.9	6.88	0.209
	AC,BD	33.0	3.92	0.119
-67	AB,DC	33.1	4.49	0.135
	BC,AD	33.0	6.92	0.210
	AC,BD	33.1	3.93	0.119
-57	AB,DC	33.2	3.76	0.113
	BC,AD	33.1	5.96	0.180
	AC,BD	33.2	2.96	0.0893
-47	AB,DC	33.1	2.51	0.0758
	BC,AD	33.2	4.68	0.141
	AC,BD	33.2	2.37	0.0715
-37	AB,DC	33.2	3.18	0.0958
	BC,AD	33.1	5.04	0.152
	AC,BD	33.2	2.36	0.0711
-27	AB,DC	33.4	1.10	0.0329
	BC,AD	33.3	1.72	0.0517
	AC,BD	33.3	0.800	0.0240
-17	AB,DC	33.4	0.841	0.0252
	BC,AD	33.3	1.38	0.0414
	AC,BD	33.4	0.592	0.0177
-7	AB,DC	33.3	0.617	0.0185
	BC,AD	33.3	0.982	0.0295
	AC,BD	33.4	0.456	0.0137
3	AB,DC	33.2	0.491	0.0148
	BC,AD	33.2	0.791	0.0238
	AC,BD	32.7	0.322	0.00985
13	AB,DC	33.3	0.3890	0.0117
	BC,AD	33.3	0.6000	0.0180
	AC,BD	33.3	0.2570	0.00772

この結果をもとに各温度における各物理量の結果を表 7 に示す。ただし、f 値は温度変化しないとして常温の値を全ての温度に適用した。計算方法は実験 2 と同様である。

表 7 温度変化に伴う各物理量の結果

温度 T(°C)	ホール抵抗 ΔR	面抵抗率	キャリア密度	移動度
-107	1.55	0.485	0.0485	26.6
-97	1.49	0.568	0.0502	21.9
-87	1.47	0.683	0.0511	17.9
-77	1.32	0.764	0.0569	14.3
-67	1.16	0.768	0.0647	12.6
-57	0.838	0.653	0.0894	10.7
-47	0.609	0.483	0.123	10.5
-37	0.263	0.552	0.285	3.97
-27	0.163	0.188	0.460	7.20
-17	0.108	0.148	0.690	6.09
-7	0.0930	0.107	0.806	7.25
3	0.0566	0.0860	1.32	5.49
13	0.0436	0.0661	1.72	5.50

このうち、キャリア密度と移動度の温度依存性をプロットした。キャリア依存性は横軸を温度の逆数にし、縦軸を対数目盛にした。

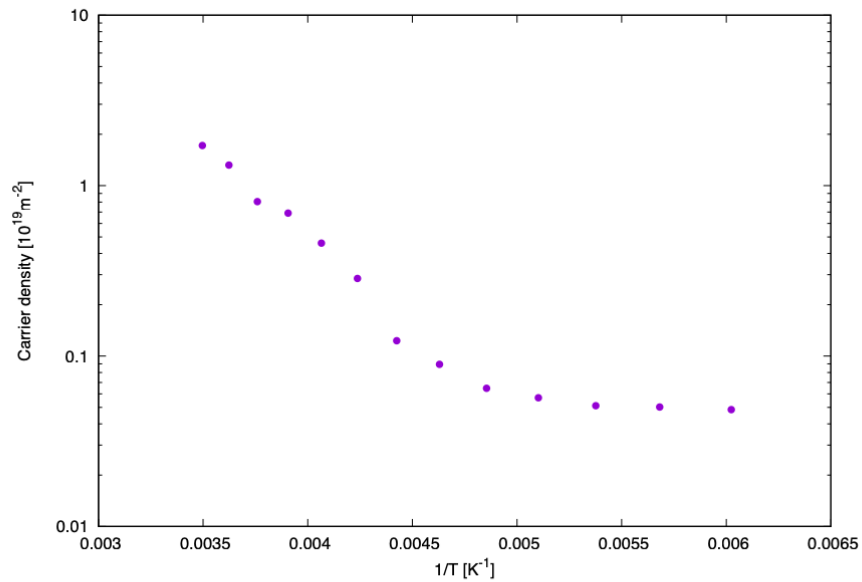


図 5 キャリア密度の温度の逆数依存性

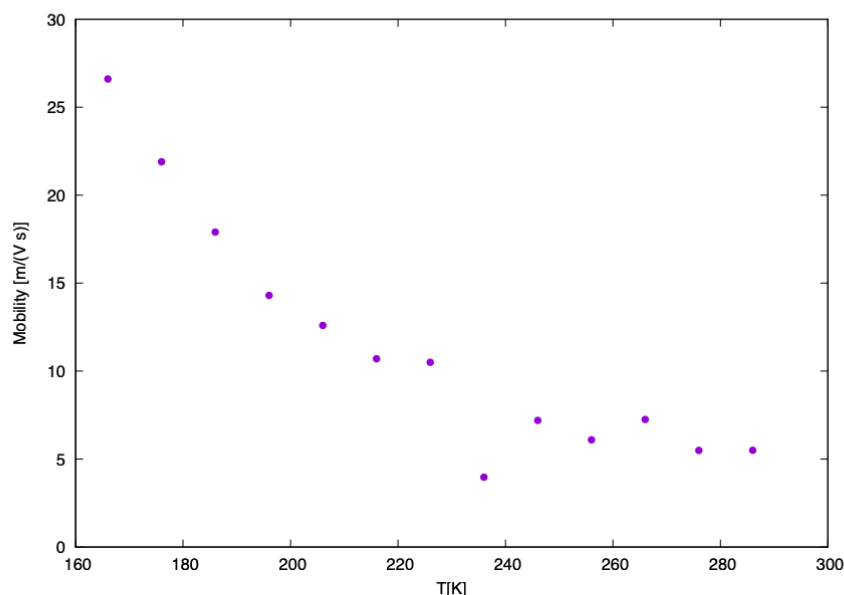


図 6 移動度の温度依存性

5.3 考察

まず、キャリアの種類を決定する。試料の向きと磁場の向き・電流の向きは実験 2 の図 4 と同じである。電圧を測る向きと電圧の符号が逆になっているのでキャリアの種類は実験 2 と同じで自由電子、すなわち n 型半導体である。

次に図 5・6 の両方で 230K 付近でグラフが不安定であることが見てわかる。これは実験方法で述べた通り、私が液体窒素を追加してしまったことが原因だろう。これは物理学実験 i 課題 3「窒素の蒸気圧曲線」でも確かめた現象で、現在の系の変化が過去に起きた変化の影響を受けるというものである。つまり、順調に温度が上昇している系に、一度外場（液体窒素）をかけて温度を下げた場合、元々辿るはずだった曲線とは別の曲線をこれから辿ることになる、という現象である。熱力学的には不可逆現象なので元の曲線軌道を再現できていないということである。

図 5 のキャリア密度の温度の逆数依存性のプロット図を見る。この図はテキスト p.157 の図 5 の領域 C・B の形と似ている。液体窒素の追加によってグラフの形は歪んでしまったが、 $1/T$ が小さい方では直線近似できそうである。すなわち T が大きい領域ではキャリア密度 n は

$$n \propto \exp(1/T)$$

となる。これは n がボルツマン分布に従っているからである。元々電子というのはフェルミオンであり、フェルミ・ディラック分布に従う粒子である。ただし、高温になると電子のドブロイ波長が短くなり、ある電子の波動関数と周囲の電子の波動関数とが重ならなくなり、量子性がなくなり、古典的に振る舞う。古典的な統計的分布はボルツマン分布である。これが高温側でこのように振る舞う理由である。一方、より低温側ではキャリア密度の変化がほとんどなく、キャリア密度が一定の領域があることが見てわかる。この領域は、ドナー電子が全て伝導帯に励起されてしまっており、これ以上温度を上げてキャリアが増えないという頭打ちの現象が生じている領域である。上でボルツマン分布といったが、この分布はドナー電子のほかに、真性半導体の電子も伝導帯に励起されることによって、この頭打ちの領域を脱している。

図 6 を見る。まずは私が途中で液体窒素を入れたために 230K 付近で不連続な変化をしていることがわかる。これは先ほど議論した。さて、温度の上昇とともに移動度は小さくなっている。キャリアは自由ではない。絶えず熱振動をしている格子（フォノン）に散乱されながら移動している。温度が上昇すると、フォノンの熱振動も激しくなり、フォノンとキャリアの散乱断面積が大きくなる。すなわち、キャリアはフォノンに移動の邪魔をされやすくなる。結果、温度が上昇すると移動度は小さくなる。

6 結論

ホール効果測定によって半導体の重要なパラメータであるキャリアの種類、キャリア密度、移動度を決定することができた。n型、p型いずれにおいても温度上昇とともにキャリア密度は大きくなり、移動度は小さくなる。