

実 験 報 告 書

題 目 電気抵抗の温度依存性 -金属と半導体の比較-

実 験 実 施 日 (西暦) 2024 年 9 月 20 日

提 出 日 (西暦) 2004 年 9 月 26 日

(再 提 出 日 (西暦) 年 月 日)

報告書作成者

学籍番号 8223001 氏名 青 快樹

共同実験者

学籍番号 8223004 氏名 天野 怜

学籍番号 8223006 氏名 安藤 愛乃

学籍番号 8223058 氏名 須貝 優一

学籍番号 8221046 氏名 辛 守彬

学籍番号 氏名

東京理科大学先進工学部マテリアル創成工学科

実験指導者記入欄	
提 出 日 /	署名
再提出指定日 /	
再 提 出 日 /	署名

チェックリスト

- ☑ 「結論」が的確にまとめられているか。
- ☑ 「結論」の長さは適切か。日本語に誤りがないか(論旨, 文法, 単語)。
- ☑ 「結論」と「実験結果」の整合性がとれているか。
- ☑ 「結論」を導くために必要十分かつ適切な「実験結果」の表現が過不足なくされているか。
- ☑ 「実験結果」はわかりやすく, 見やすく, 正確に表現されているか。
- ☑ グラフの軸, 表の項目, グラフや表のタイトルに漏れはないか, 適切か。
- ☑ 有効数字は適切か。単位が漏れていないか。
- ☑ (写真を用いる場合) 写真の明るさやコントラストは適切か。
- ☑ 「実験結果」を得るために必要な「方法」が過不足なく表現されているか。
- ☑ 「目的」が明記されているか。「目的」と「結論」の整合性がとれているか。日本語が適切か。
- ☑ 「なぜこの目的で実験をしたか」が「背景」に的確に表現されているか。日本語が適切か。
- ☑ 必要に応じて適切に参考文献の引用情報が記述されているか。

参考文献: 議論の裏付けを与えるものであるから, 実験題目に関係がある文献を偏りがな
いようにできる限り引用する。文献の表記方法を参考として下記に記述しておく。

 - 1) 著者名, 書籍名, 発行所, ページ, 発行年
 - 2) 著者名, 雑誌名, 巻, 号, ページ, 発行年
- ☑ 全体としてわかりやすいか。
- ☑ 「背景」が1ページを超えていないか。
- ☑ 「実験方法」が1ページを超えていないか。
- ☑ 「結論」が100字程度で記されているか。

1.背景

現在の世の中で、半導体は必要不可欠な存在となっている。トランジスタやダイオードなどの半導体デバイスは、コンピュータ、スマートフォン、家電、通信機器など、あらゆる電子装置の基本構成要素として使用されている。これらのデバイスは、電気信号を制御し、情報処理やエネルギー変換を効率的に行うため、半導体材料がその性能を大きく左右する。近年では太陽電池やLEDといったエネルギー変換デバイスにも半導体が欠かせない存在となっている。ダイオードやトランジスタ、集積回路などの半導体素子に使用されている半導体材料はシリコンが使われている。その他にも、半導体材料としては化合物結晶であるガリウムヒ素が用いられている。ガリウムヒ素の特徴は電子の移動度が大きいため応答速度が速いという特徴がある。^[1.1]

そもそも半導体の概念は19世紀後半に初めて登場し、1950年代にはトランジスタの発明により急速に発展を遂げた。最初に発見された半導体材料は、セレンやテルルなどの化合物であったが、1930年代にはシリコンやゲルマニウムの特性が注目され、電子工学の発展に寄与することとなった。1947年、ジョン・バーディーン、ウォルター・ブラッテン、ウィリアム・ショックレーによってトランジスタが発明され、これが半導体技術の飛躍的な進化の始まりとなった。1960年代には、ジャック・キルビーとロバート・ノイスによって、集積回路(IC)が独立して発明され、ICは多数のトランジスタと他の電子部品を極小のシリコンチップに統合し、これまでに比べてはるかに高密度で高性能な電子回路を実現させた。半導体デバイスはその後、急速に小型化と高性能化を遂げ、グローバル化し、現在の情報化社会を支える技術的基盤となっている。

半導体にはp型とn型に分かれている。シリコンに不純物を溶かし込んだ半導体を不純物半導体という。この半導体には電子が1個不足しており、それが要因で正孔が1個できている状態になる、正孔は熱エネルギーにより半導体結晶内を自由に動き回ることができる。このような半導体はp型半導体と呼ばれている。一方で、シリコンの結晶に不純物としてリンなどを溶かし込んだ半導体は電子が1個余り、熱エネルギーにより電子が半導体結晶内を自由に動き回ることができる半導体をn型半導体と呼ぶ。p型半導体にするために溶かし込む不純物は、ホウ素以外に、インジウム、ガリウム、アルミニウムなどがあり、n型半導体にするために溶かし込む不純物は、リン以外にヒ素、アンチモンなどがある。^[1.2]

半導体の電気伝導性は、温度に大きく依存する性質を持つ。温度が上昇すると、半導体内の電子が活性化され、自由電子や正孔の数が増加するため、電気伝導性が向上する。逆に、温度が低下するとキャリア数が減少し、抵抗が大きくなる。なぜなら、半導体には伝導帯と価電子帯にバンドギャップがあるため、常温では価電子帯にある電子が伝導帯に励起する確率が低くなる。しかし、温度が上昇するにつれて熱的に電子が伝導帯へ励起するため温度上昇に伴い電気抵抗は低くなる。一方で、金属の場合はバンドギャップは存在せず、温度上昇によって原子の格子振動が活発化し、自由電子が格子に散乱されるため、電子の移動が妨げられる。なので、電気抵抗が上昇し、導電性が低下する。絶縁体の場合には半導体よりも非常に大きいバンドギャップが存在するため、非常に高温だとしてもわずかしき電気抵抗は低下しない。

今回の実験では、濃度の異なる4つの半導体を用いて、電気抵抗と不純物濃度の関係を明らかにすることを目的とした。

2.方法

2.1 熱電対の校正

たらいに氷水を満たし、二つの冷接点と温接点を各々つけ、たらい内の温度を温度計で測った。また、熱電対に発生する起電力をテスターで測定し、たらい内の温度が 0 °C に下がったら、テスターの起電力も 0 になっていることを確認した。その後、ビーカーを利用して、10 °C の水を用意し、それに温接点をつけ、熱起電力を測定した。同様に 20 °C、30 °C、40 °C、50 °C の水の熱起電力を測定した。最後に結果を線形グラフにまとめ、プロット点を直線でつないだ。

2.2 未知濃度試料の測定

熱電対の校正結果から 50 °C、60 °C、70 °C…120 °C の起電力を読み取った。熱電対の冷接点を氷水で満たしたビーカーに入れ、温接点をホットプレート上の銅板にさした。ホットプレートの温度を上昇させ、50 °C、60 °C…120 °C での抵抗を記録し、サンプル毎に、横軸を温度、縦軸を抵抗にとった線形プロットを作った。

2.3 4 種の半導体試料の測定

ホットプレート温度を上昇させ、ドープ量の異なる 4 種の n 型半導体を 50 °C から 120 °C まで 5 °C 刻みで測定し、結果のデータを Excel でグラフにした。

3.結果

3.1 熱電対の校正

0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃の氷水に温接点をつけ、測定した熱起電力を表 1 にまとめた。

表 1 各温度の熱起電力

温度 [°C]	熱起電力 [mV]
0	0.001
10	0.413
20	0.773
30	1.203
40	1.631
50	2.017

また、この表を図 1 に横軸を温度、縦軸を起電力としてプロットした。

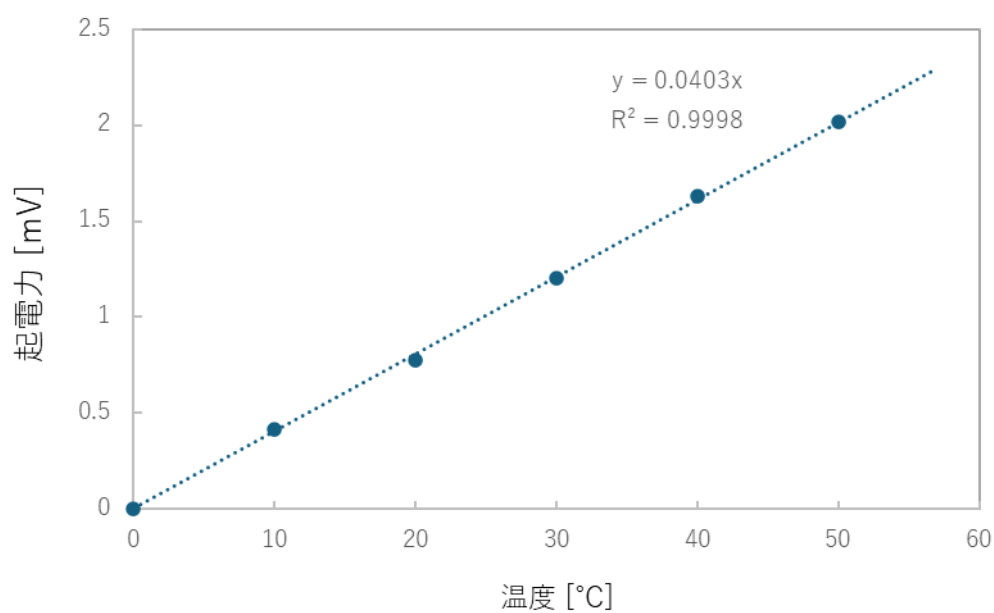


図 1 温度と熱起電力の関係

表 1、図 1 から、温度が上がるにつれ熱起電力も上がっている、また、 R^2 値が 1 にかなり近いことから、使用した熱電対は正しい値を測定していることが明らかである。

3.2 未知濃度試料の測定

図 1 の近似直線から求めた 50 °C、60 °C、70 °C…120 °C の熱起電力と、ホットプレートを上昇させてテスターから得た抵抗を表 2 にまとめた。

表 2 未知濃度の n 型半導体における各温度の熱起電力と抵抗

温度 [°C]	起電力 [mV]	抵抗 [Ω]
50	2.02	0.70
60	2.42	1.00
70	2.83	1.30
80	3.23	1.50
90	3.64	1.70
100	4.04	1.80
110	4.45	2.00
120	4.85	2.10

また、表 2 から温度と抵抗の関係を図 2 にプロットした。

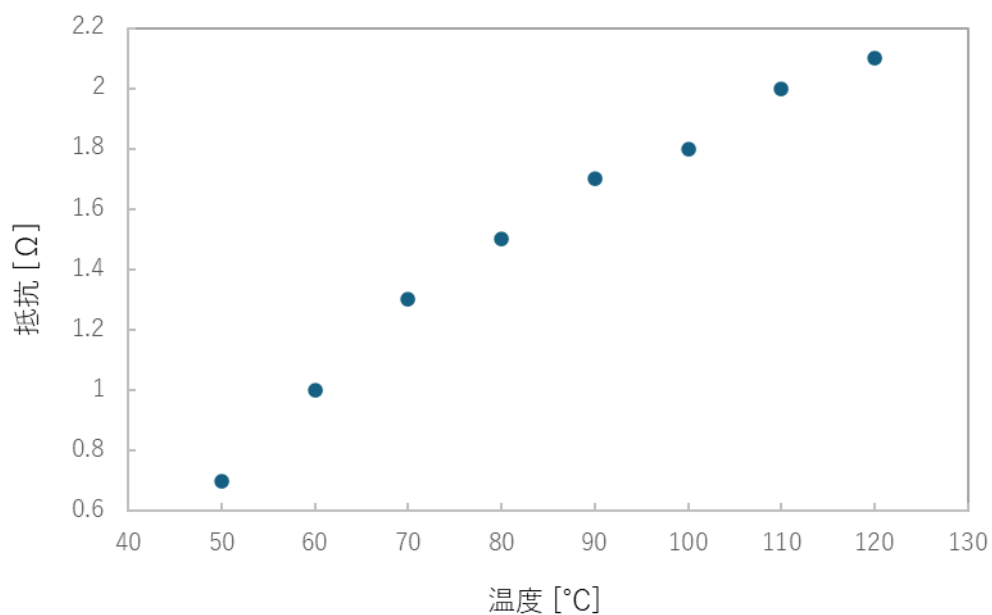


図 2 温度と抵抗の関係

表 2 と図 2 から、n 型半導体における抵抗は温度が上がるほど抵抗も上がることが明らかになった、また、一定に上がるのではなく緩やかに上がっていている。

3.3 4種の半導体試料の測定

ホットプレートで温度上昇し、5℃きざみで測定したドーパ量の違う4つの抵抗を表3にまとめた。

表3 4つの半導体試料の抵抗と温度の関係

温度 [°C]	抵抗 [kΩ]			
	$10^{15} [\text{cm}^3]$	$10^{17} [\text{cm}^3]$	$10^{18} [\text{cm}^3]$	$10^{20} [\text{cm}^3]$
50	104	0.528	0.465	0.463
55	90.1	0.538	0.458	0.457
60	77.1	0.544	0.457	0.444
65	66.8	0.555	0.457	0.427
70	57.4	0.565	0.455	0.416
75	49.8	0.575	0.457	0.400
80	43.0	0.586	0.458	0.380
85	37.6	0.598	0.460	0.365
90	32.9	0.611	0.463	0.350
95	28.7	0.625	0.470	0.336
100	25.5	0.637	0.474	0.323
105	22.9	0.651	0.484	0.307
110	20.5	0.665	0.488	0.291
115	18.4	0.682	0.497	0.272
120	16.6	0.698	0.501	0.253

表3の抵抗の値を見てみるとドーパ量が多ければ多いほど抵抗の値は小さくなっていることが明らかである。次に、4種の抵抗の値は温度が上昇につれ、どのように変化しているのかをグラフにプロットした。

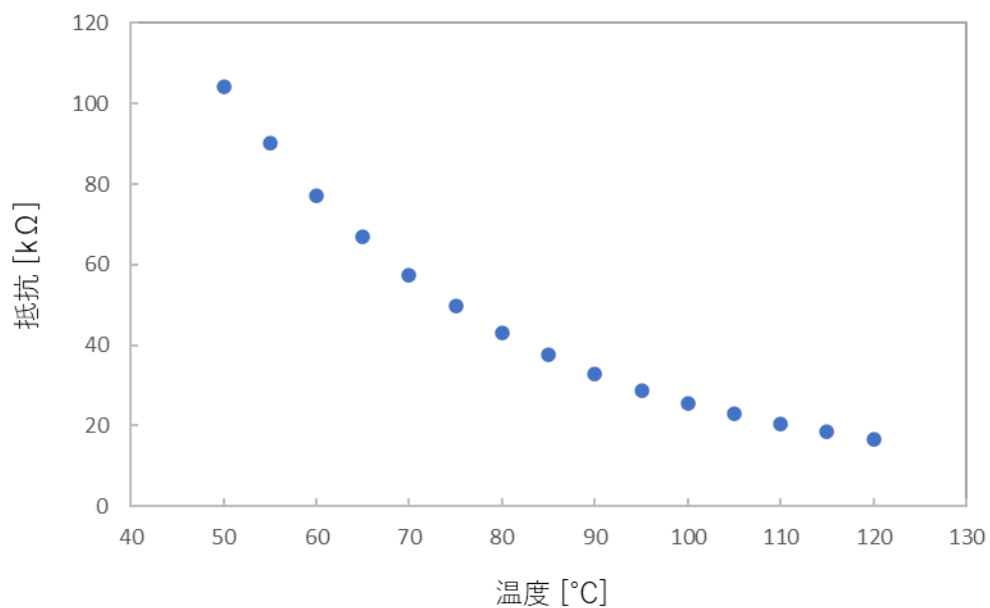


図3 ドープ量が $10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体の抵抗と温度の関係

このグラフから、ドープ量が $10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体では温度上昇につれて、抵抗が低くなっていることが明らかである。

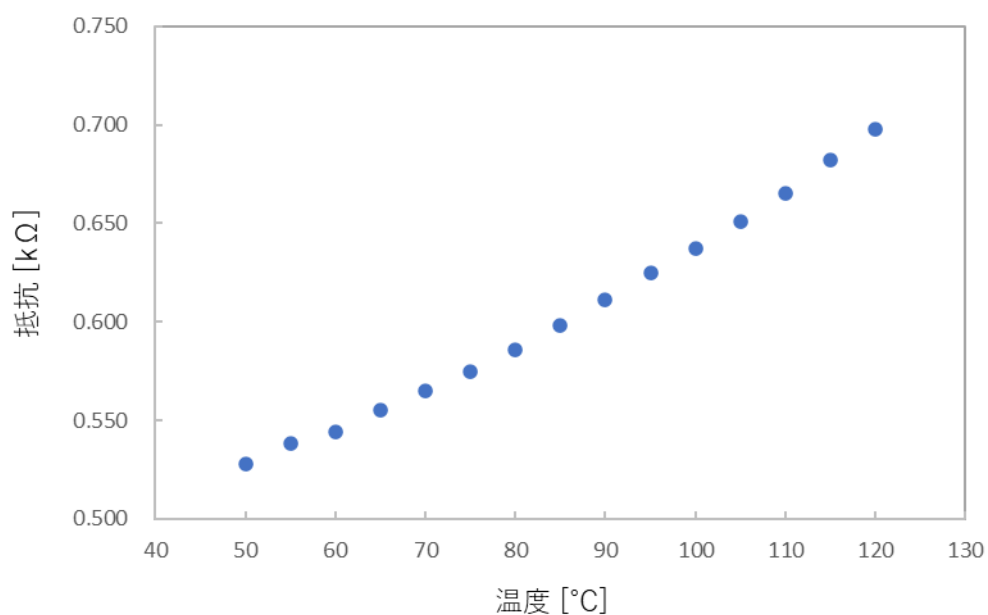


図4 ドープ量が $10^{17} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体の抵抗と温度の関係

このグラフから、ドープ量が $10^{17} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体では温度上昇につれて、抵抗が大きくなっていることが明らかである。ドープ量が $10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体のグラフと比較すると、温度上昇につれて以降の値は、ほぼ真逆の値をとっていることがわかる。

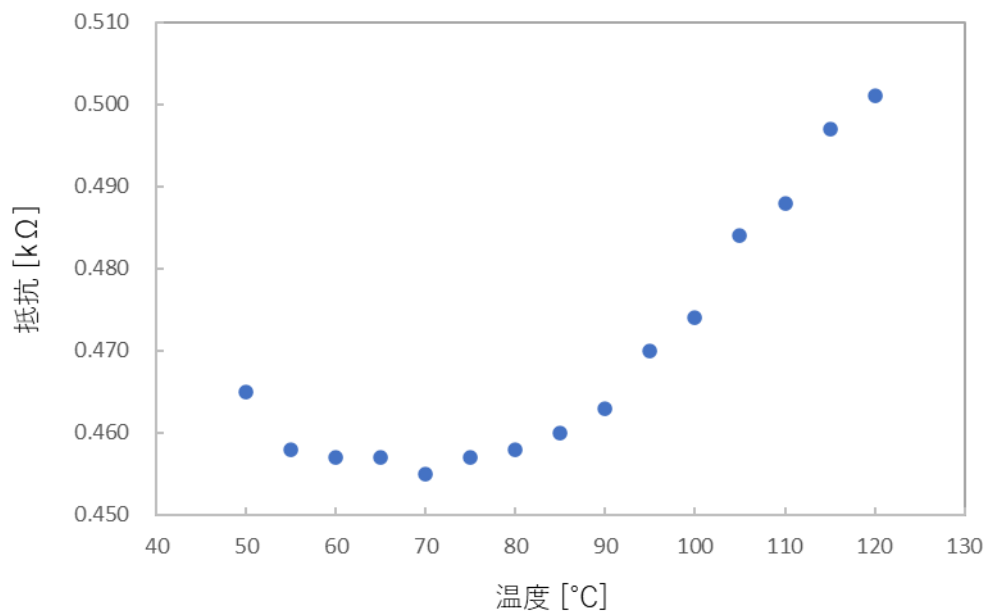


図 5 ドープ量が $10^{18} \text{ [cm}^{-3}]$ の n 型半導体の抵抗と温度の関係

ドープ量が $10^{18} \text{ [cm}^{-3}]$ の n 型半導体の抵抗値は、最初の 50 °C から 70 °C になるまで徐々に低くなり、70 °C 以上からは、少し変化量が大いだが、ドープ量が $10^{17} \text{ [cm}^{-3}]$ の n 型半導体のグラフとほぼ同じように、次第に大きくなっていることが明らかである。

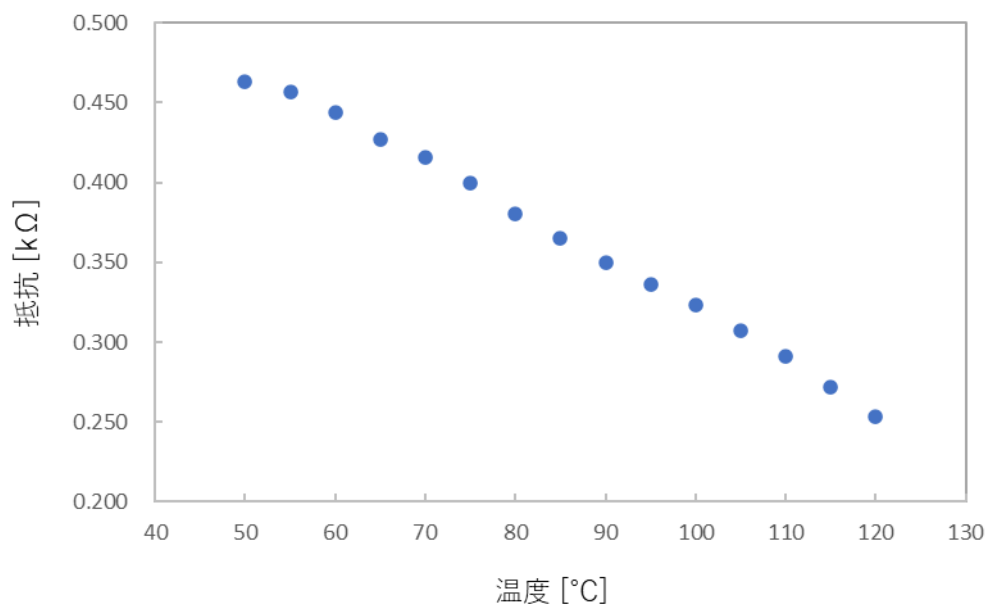


図 6 ドープ量が $10^{20} \text{ [cm}^{-3}]$ の n 型半導体の抵抗と温度の関係

ドープ量が $10^{20} \text{ [cm}^{-3}]$ の n 型半導体は、温度上昇につれて、抵抗値はほぼ一定に低くなっていることが明らかである。この、変化の仕方はドープ量が $10^{17} \text{ [cm}^{-3}]$ の n 型半導体の変化の仕方のほぼ真逆といえる。

4. 考察

4.1 4種の半導体について

4.1.1 不純物濃度と電気抵抗の関係

電気抵抗とは、電流の流れにくさのことであるので、つまり、電子の移動しにくさを表している。そこで、電子の移動度の式は以下のように表すことができる。 $(\mu$ を移動度、 q を電荷量、 m を電荷の質量、 τ を散乱されないで進める時間) [2]

$$\mu = \frac{q\tau}{m} \quad (1)$$

q 、 m は定数のため他 2 つの文字について着目する。

(1)式より、 τ が大きくなればなるほど移動度 μ は大きくなる。

不純物は電子や正孔を供給した後、イオンとなり結晶中に存在し、伝導電子や正孔を散乱させてしまうため τ が小さくなってしまう。濃度が高くなった場合を考えてみる。濃度が高い場合、結晶中の部分的な電場やキャリアの再結合が増加するため、自由電子や正孔が捕獲されやすくなり、イオン化効率が低下する。一方、濃度が低い場合、キャリアの再結合やキャリア間の相互作用が少なくなるため、イオン化されたキャリアが自由に動きやすくなる。なので、不純物の濃度が低ければ低いほどイオン化されやすい。つまり、濃度が低いほど τ は小さくなり、電子の移動度が低下し、電気抵抗が大きくなる。という、不純物濃度と電気抵抗の関係が考えられる。

4.1.2 グラフの概形について

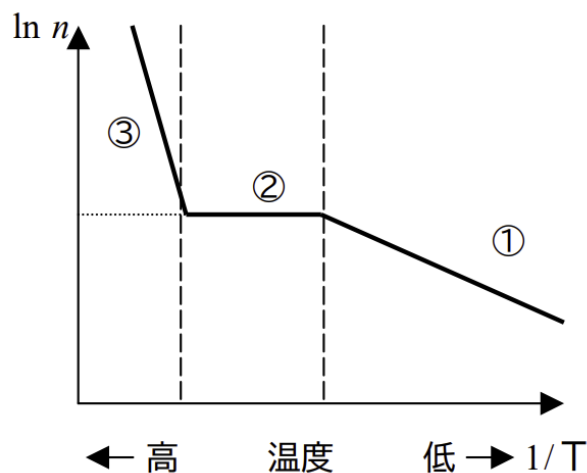


図 7 n 型半導体における電子濃度と温度の関係 [3]

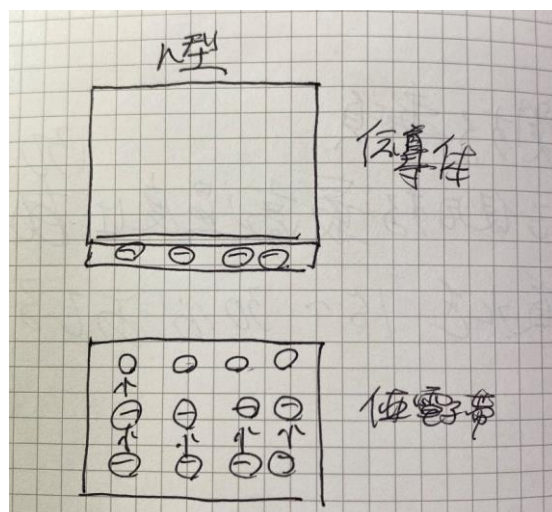


図 8 n 型半導体のバンド図

低温の場合、価電子帯に比べて伝導帯の準位に近いドナー準位にある電子が伝導帯へ励起される。しかし、価電子帯の電子は伝導帯に励起するだけのエネルギーを受け取ることができないので励起しない、この領域を不純物イオン領域といい、不純物イオン領域よりさらに温度を上昇させるとドナー準位にある電子は伝導帯に出尽くす。しかし価電子帯の電子はまだ伝導帯に励起するだけのエネルギーを受け取ることができない、この領域を飽和領域といい、そして、外因性領域よりもさらに温度を上昇させていくと価電子帯の電子は伝導帯に励起するだけのエネルギーを受け取り励起する領域を真性領域とよばれ、図 7 での①を不純物イオン領域、②を飽和領域(外因性領域)、③が真性領域である。^[3]

表 3 の 4 つのサンプルの状態がどの領域に相当するのか確かめるには、各サンプルのグラフの傾きで見極める。

図 7 より、領域の違いは温度にも依存しているが電子濃度にも依存している。不純物はドーピングした後、結晶内でイオン化されキャリアが生成される。そして、キャリアの数が多いほど電気抵抗は低くなる。つまり、温度上昇とともに電気抵抗の傾きが急激に減少したら、キャリアを多く生成する低温状態である不純物イオン領域、温度が上昇しても傾きが緩やかであれば、不純物がほぼすべてイオン化された飽和状態と考えられる。また、真性領域であるものは、高温状態のため、熱エネルギーにより図 8 に示したバンドギャップを超えて、キャリアが生成されるため、再び電気抵抗が急激に低下すると考えられる。また、温度上昇によるキャリア生成のため上限がないため、不純物イオン領域よりもグラフの傾きの勾配は急になっていると考えられる。

上記を踏まえ、図 3、図 4、図 5、図 6 を見てみると、

図 3 は、他のグラフと見比べると、ドーパ量が $10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体の電気抵抗の減少に仕方が約 1000 倍異なることが表 3 から明らかである。また、ドーパ量が $10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体と比べると電子濃度が低いイオン化される不純物の数も少ない。このことから、ドーパ量が $10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体は真性領域の状態にあると考えられる。

図 4 は電気抵抗が増加しているが、変化量が小さく緩やかな傾きであるため、ドーパ量が $10^{17} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体は飽和領域の状態にあると考えられる。

図 5 は、電気抵抗が一度減少してからまた増加しているためドーパ量が $10^{18} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体の状態は不純物イオン領域と飽和領域の境目だと考えられる。

図 6 では、温度上昇とともに電気抵抗は減少している。そして、比較的ドーパ量が多いため、イオン化される不純物が多く、不純物イオン領域の範囲が広がっていると予想できるため、ドーパ量が $10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体は不純物イオン領域だと考えられる。

4.2 未知濃度試料の不純物濃度の推定

表 2 と表 3 を比較してみると、未知濃度試料の電気抵抗の方が小さいことが明らかである。これは、縮退半導体と呼ばれるものに相当すると考えられる。縮退半導体とは、大量の電子を供給する不純物を添加することで、伝導体や価電子帯に電子が供給され、バンドギャップが縮小し、金属のような状態に近づいている半導体のことであり、金属に近づくことから、高い誘電率を持ち抵抗値は低くなる。ドーパ量が $10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ の n 型半導体の抵抗値よりも低い抵抗値となっているので未知濃度は $1.0 \times 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ 以上のものだと予想できる。そして、温度上昇とともに、電気抵抗も上がっていることから、未知濃度は飽和領域の状態であるような縮小半導体にする不純物濃度だと考えられる。

5. 結論

表 3 を見てみると、ドーパ量の多い n 型半導体の方が電気抵抗は小さくなっていることが明らかである。これは、添加した不純物の濃度が低いほど不純物は結晶内でイオン化されやすく、濃度が高いほどイオン化されにくい。(1)式で示した通り、多くの数がイオン化されると伝導電子や正孔を散乱させてしまうため τ が小さくなる、そのため電子の移動度も低下し、電気抵抗は増加するという関係が明らかになった。

参考文献

- 【1】 佐藤 一郎 図解入門・半導体の ABC 技術評論社 P8 P12 2002 年
- 【2】 岩崎 裕 半導体物性レクチャーノート 日刊工業新聞 P178~P182 1986 年
- 【3】 北川 修久 不純物イオン領域・外因性領域・真性領域 大阪電気通信大学 [真性領域・枯渇領域・外因性領域 IntrinsicRange・ExhaustionRange・ImpurityRange](#) 北川修久 (osakac.ac.jp)