

令和 7 年度
実 験 レ ポ ー ト

題目	半導体デバイス作製実験
----	-------------

学 科	電気電子システム工学コース
学籍番号	a0527
氏 名	野口 史遠
提 出 日	令和 7 年 8 月 8 日



舞鶴工業高等専門学校

目次

第 1 章 概要	1
第 2 章 理論	2
2.1 半導体とは	2
2.2 pn 接合	2
2.3 ショットキー接触	2
2.4 オーミック接触	3
2.5 光起電力効果	3
2.6 ダイオードの電流-電圧特性と各パラメータの導出方法	3
第 3 章 実験	5
3.1 第 1 週：ダイオードの電気特性測定	5
(1) 並列抵抗 R_p	6
(2) 直列抵抗 R_s	6
(3) 理想係数 n	7
(4) 実装上の工夫と補足	7
(5) 結果出力例	7
3.2 第 2 週：液体金属を用いた pn 接合ダイオードの作製	11
① Si ウェハの切り出し	11
② 基板の洗浄	12
③ 液体金属による電極形成	13
注意点	14
3.3 第 3 週目：液体金属 pn 接合ダイオードの測定	15
3.4 結果及び考察	17
参考文献	19
付録	20
A.0.1 パラメーター導出プログラム	20

第 1 章 概要

本実験はダイオードの特性理解からデバイス作製，評価までを行う．

第 1 週では，ダイオードの基本特性について学習し，実際の測定を通じてその動作原理を確認する．具体的には，ダイオードの電流-電圧特性を測定し，以下のパラメータを抽出・解析する

- 直列抵抗
- 並列抵抗
- 理想係数 n

第 2 週では，ダイオードの作製方法について学習し，実際にデバイスの作製を行う．この週では以下の項目の理解を目的とする．

- デバイス構造の設計
- デバイス作製プロセスの実践

第 3 週では，前週で作製したダイオードデバイスの特性測定と評価を実施し，作製プロセスと得られた特性の関係について考察を行う．

第 2 章 理論

2.1 半導体とは

物質は電子を通す導体（銅，アルミニウムなど）と通さない絶縁体（プラスチック，ゴムなど）と条件を満たすと通す半導体の 3 つに分かれる．半導体は 14 族の Si, Ge, GaAs などが存在する．現在 Si が主に使用されており，理由は大きく 4 つある．

1. 地球で 2 番目に多い元素のため，資源が豊富である
2. 不純物を取り除きやすく，高純度化しやすい
3. 単結晶化と不純物の量を調整して，抵抗率の制御がしやすい
4. 安定した酸化膜ができ，集積化などの加工がしやすい

純粋なシリコンやゲルマニウムの結晶の性質は絶縁体に近く，電圧をかけても電気はほとんど流れない．結晶中の電子同士が固く結合していて，自由に動き回れる電子はわずかしかない．しかし，電子を余計に持っている P（リン）などの不純物をほんの少し加えるだけで，導体のような性質に変化する．この P のように電子を余計にもった不純物が含まれるものを N 型半導体，逆に電子の少ないホウ素などの不純物が入ったものを P 型半導体と呼ぶ．

ダイオードとは電気の流れを一方通行にする半導体素子である．ダイオードは整流（交流を直流に変換する操作），検波（無線信号から音声信号を取り出す操作）などに使用される．

2.2 pn 接合

p 型半導体と n 型半導体を接合した構造を pn 接合と呼ぶ．この接合部では，n 型半導体中の電子が p 型半導体へ拡散し，p 型中の正孔と再結合することで空乏層が形成される．同様に，p 型の正孔も n 型側に拡散し，再結合する．これにより接合部付近には移動キャリアが存在しない空間電荷領域ができ，内部電界が形成される．この内部電界によって拡散電流とドリフト電流が釣り合い，熱平衡状態となる．

pn 接合に外部電圧を印加すると，このバリアが変化する．順方向にバイアスをかけると内部電界が弱まり，電流が流れやすくなる．逆方向にバイアスをかけると内部電界が強まり，電流はほとんど流れなくなる．このように，pn 接合は整流作用を持つ素子となる．

2.3 ショットキー接触

金属と半導体を接触させたとき，両者の仕事関数の違いによりエネルギー障壁が形成されることがある．金属の仕事関数 ϕ_M よりも半導体の仕事関数 ϕ_S が小さい場合，電子は半導体から金属に移動し，半導体側に空乏層が形成される．これをショットキー接触と呼び，整流特性を示すダイオード動作を実現できる．

このショットキー障壁は金属側からの電子の注入を阻止する働きを持ち、逆バイアスでは電流が流れにくくなる一方、順バイアスでは障壁が下がり、電子が金属に注入され電流が流れる。この特性は pn 接合ダイオードと同様の整流性を持つが、キャリアの注入機構が異なるため高速応答性が高い。

2.4 オーミック接触

一方、金属の仕事関数 ϕ_M よりも半導体の仕事関数 ϕ_S が大きい場合、接触界面には障壁が形成されず、電子は容易に移動できる。このような接触はオーミック接触と呼ばれ、I-V 特性は線形となり、電流は両方向に自由に流れる。

オーミック接触は素子の電極として重要であり、理想的には接触抵抗が小さくなるように設計される。実際にはドーピング濃度を高くすることで空乏層を極めて薄くし、トンネル効果を利用してオーミック接触を形成する場合が多い。

2.5 光起電力効果

pn 接合に吸収端波長より短い波長の光を照射すると、電子と正孔の対が生成される。この際、空乏層内で生成されたキャリアは内部電界の影響でそれぞれ異なる方向へドリフトし、接合部を中心に電荷の分離が起こる。

この電荷分離により接合部には電位差が生じ、外部回路に電流を流すことが可能となる。これを光起電力効果 (photovoltaic effect) と呼ぶ。太陽電池はこの原理に基づいており、照射された光の強度に応じて起電力が変化する。

なお、光照射が強くなると、空乏層によるエネルギーバリアが減少し、最終的にはバンドがフラットになり、それ以上の電位差は生じなくなる。これにより太陽電池の開放電圧には理論的な上限が存在する。

2.6 ダイオードの電流-電圧特性と各パラメータの導出方法

ダイオードの理想的な電流-電圧関係式は以下の式で表される。

$$I = I_s \left(e^{\frac{q(V - IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

ここで、各記号の意味は以下の通りである：

- I ：ダイオードを流れる電流 [A]
- V ：ダイオードに印加される電圧 [V]
- I_s ：逆方向飽和電流 [A]
- R_s ：直列抵抗 [Ω]
- n ：理想係数 (1~2)
- q ：電気素量 (1.602×10^{-19} C)

- k : ボルツマン定数 (1.381×10^{-23} J/K)
- T : 絶対温度 [K] (通常 300 K 近傍)

直列抵抗 R_s の導出方法

直列抵抗は、ダイオードの順方向電圧-電流特性の高電圧領域における傾きから求めることができる。この領域では指数項が大きくなり、次のように近似できる：

$$V \approx IR_s + \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) \quad (2.2)$$

この式の両辺を I で微分すると、以下の関係が得られる：

$$\frac{dV}{dI} = R_s + \frac{nkT}{qI} \quad (2.3)$$

電流 I が十分大きい領域では、第 2 項が小さくなるため、おおよそ

$$\frac{dV}{dI} \approx R_s \quad (2.4)$$

より、I-V カーブの高電流領域の傾きが R_s に一致する。したがって、順方向特性の傾きを微分法や近似直線により取得することで R_s を算出できる。

並列抵抗 R_p の導出方法

並列抵抗は、逆方向にバイアスをかけた際に流れる漏れ電流による抵抗成分を表す。このときのダイオードはほぼ抵抗として動作するため、以下の式が成り立つ：

$$R_p = \left| \frac{dV}{dI} \right|_{V < 0} \quad (2.5)$$

逆方向の低電圧領域（線形部分）の I-V グラフの傾きから求めることができる。

理想係数 n の導出方法

直列抵抗による電圧降下が無視できる場合（低電流領域）、式 (1) を以下のように近似できる：

$$I \approx I_s \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (2.6)$$

両辺の対数をとることで直線関係に変換できる：

$$\ln I = \ln I_s + \frac{qV}{nkT} \quad (2.7)$$

この式は V に対して直線であり、傾き a は以下のようになる：

$$a = \frac{q}{nkT} \quad (2.8)$$

したがって、傾き a を求めれば理想係数 n は次式で求まる：

$$n = \frac{q}{akT} \quad (2.9)$$

具体的には、順方向 I-V 特性を半対数グラフ（縦軸を $\log I$ 、横軸を V ）でプロットし、直線部分の傾きを取得することで n を導出できる。

第 3 章 実験

3.1 第 1 週：ダイオードの電気特性測定

実験方法

本実験では、ダイオードの電流-電圧特性を測定することで、その整流特性や理想係数、直列抵抗、並列抵抗などのパラメータを導出することを目的とする。

使用機器は直流電圧・電流源／モニタである **6242** を用いた。本機器は電圧を掃引しながら電流を測定する機能を有し、高精度な IV 特性の測定が可能である。

測定にあたって設定したパラメータを以下に示す。

- スweepモード：DC
- スタート電圧：2 V
- ストップ電圧：-2 V
- ステップ電圧：0.005 V
- 電流リミッタ：0.002 A
- 測定モード：2 端子測定
- インターフェース：USB

測定は 2 V から -2 V の範囲で、0.005 V 間隔の Sweep を行い、その際の電流値を測定した。測定されたデータは CSV 形式で保存され、後の解析で用いた。

本実験の測定方式は「2 端子測定」としており、ダイオードに流れる電流と印加電圧を直接取得する構成となっている。また、オート・ゼロ機能は OFF とし、メモリ・ストアはノーマル設定で利用した。



図 3.1 : 測定器具 6242

パラメータ導出の理論とプログラムの仕組み

本実験では、測定したダイオードの電圧-電流データ（CSV 形式）を用いて、以下のパラメータを Python で解析した：

- 並列抵抗 R_p
- 直列抵抗 R_s
- 理想係数 n

使用プログラムは `pandas`, `numpy`, `scipy.stats.linregress` を用いて線形回帰を実施している。

(1) **並列抵抗 R_p** 並列抵抗は、逆バイアス領域（本実験では $V < -0.1$ V）における I-V 特性の傾きとして次のように定義される：

$$R_p = \left| \frac{dV}{dI} \right|_{V < 0} \quad (3.1)$$

この領域では、ダイオードは抵抗的に振る舞うため、`linregress` によって取得された直線の傾き（電圧 vs 電流）から R_p を導出する。

(2) **直列抵抗 R_s** 順方向バイアス領域における高電流部分（例： 0.25 V $< V < 0.35$ V）では、指数関数的な立ち上がりが飽和し、内部抵抗が支配的となる。この領域の I-V 直線部分の傾きを用いて次のように求める：

$$R_s = \frac{dV}{dI} \quad (3.2)$$

この傾きは、ダイオード内部の接触抵抗やリード線の抵抗などの影響を含むものである。

(3) **理想係数 n** 理想係数 n は、順方向バイアス領域の指数関数的な I-V 関係：

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (3.3)$$

の両辺を自然対数変換し、直線化された関係式から導出する：

$$\ln I = \ln I_s + \frac{qV}{nkT} \quad (3.4)$$

このとき、 $\ln I$ と V の散布図を作成し、線形回帰によって傾きを求めることで、理想係数 n は以下の式で算出できる：

$$n = \frac{q}{kT \cdot \text{slope}} \quad (3.5)$$

(4) 実装上の工夫と補足

- **逆方向領域** ($V < -0.1$ V) で R_p を計算. ノイズを避けるために傾きが正の領域のみを対象とする.
- **直線領域** (例：0.25 V～0.35 V) を用いて R_s を導出. 電流がリミッタに達していない領域のみを使用.
- **理想係数 n** は、 $\ln(I)$ と V の回帰から求めるほか、複数電圧範囲での推移を可視化して、定性的評価も実施.
- 単位は mA で扱い、 $\text{np.log}(I \times 1000)$ により変換を行っている.
- 測定ノイズや異常値を避けるため、スロープが負または異常に大きい場合 (例： $n > 10$) は無視する.

(5) **結果出力例** プログラムは最終的に以下のような出力を行う：

=== ダイオード解析結果 (1 回目測定) ===

並列抵抗 $R_p = 4567.89 \ \Omega$

直列抵抗 $R_s = 12.34 \ \Omega$

理想係数 $n = 1.58$

=== 理想係数 n の計算結果 ===

電圧 0.18 V: $n = 2.01$

電圧 0.23 V: $n = 1.67$

電圧 0.28 V: $n = 1.45$

これにより、各パラメータが明確に数値化され、ダイオード特性の比較・評価が可能となる。

結果

本実験では、2種類のショットキーダイオードを用いて特性の違いを比較した。使用した素子は以下の通りである：

- **SBM1045VSS**（電力用ショットキーダイオード，最大定格：45V 10A）
- **1SS106**（小信号用ショットキーバリアダイオード）

両素子ともに、金属-半導体接触によるショットキー接合を用いた整流素子であり、高速応答性および低順方向電圧降下を特徴とする。

測定範囲は共通して以下のように設定した：

- 電圧範囲：-2.00 V ～ 2.00 V
- 電流範囲（SBM1045VSS）： -3.59×10^{-8} A ～ 2.00×10^{-3} A
- 電流範囲（1SS106）： -2.00×10^{-10} A ～ 2.00×10^{-3} A

図 3.2 および図 3.3 に、各素子の I-V 特性および $\ln(I)$ -V 特性を示す。

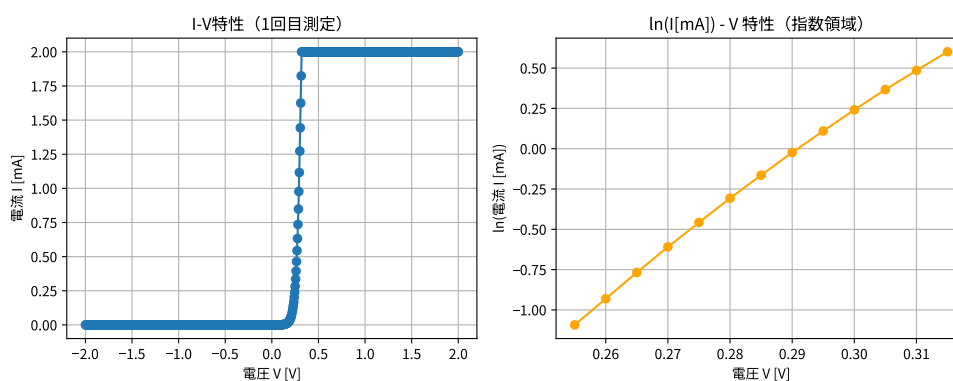


図 3.2 : SBM1045VSS の I-V 特性および $\ln(I)$ -V 特性

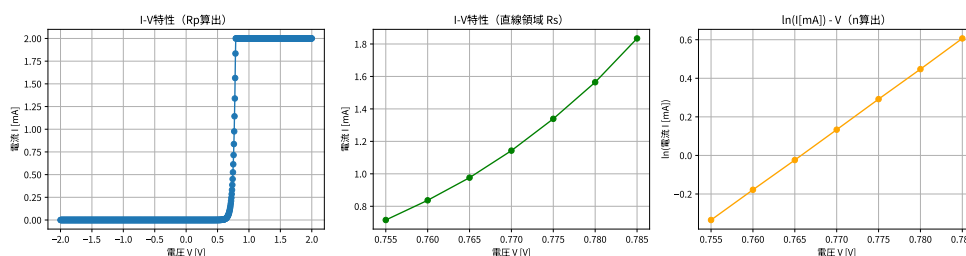


図 3.3 : 1SS106 の I-V 特性および $\ln(I)$ -V 特性

解析により得られたパラメータを以下にまとめる：

表 3.1 : 2 種ショットキーダイオードの解析結果比較

項目	SBM1045VSS	1SS106
並列抵抗 R_p [Ω]	1.69×10^8	1.09×10^8
直列抵抗 R_s [Ω]	39.45	26.55
理想係数 n	1.37	1.23

指数領域における理想係数 n の電圧依存性を図 3.4 および図 3.5 に示す。

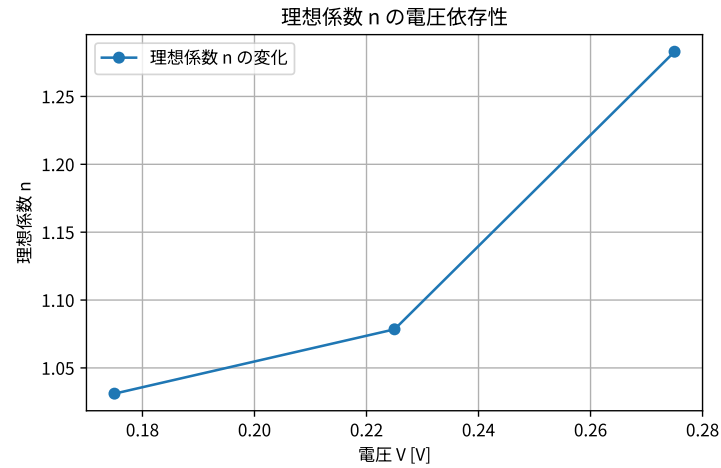


図 3.4 : SBM1045VSS の理想係数 n の電圧依存性

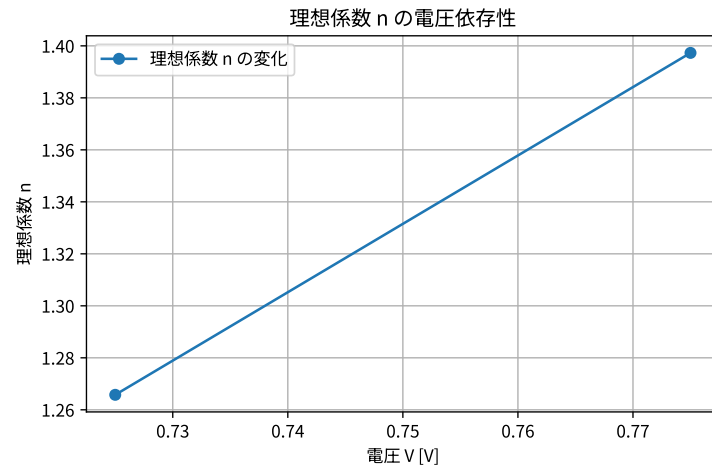


図 3.5 : 1SS106 の理想係数 n の電圧依存性

電圧範囲別の理想係数は以下の通りである：

- SBM1045VSS:
 - $V = 0.17 \text{ V} : n = 1.03$

- $V = 0.23 \text{ V} : n = 1.08$
- $V = 0.28 \text{ V} : n = 1.28$
- 1SS106:
 - $V = 0.73 \text{ V} : n = 1.34$
 - $V = 0.75 \text{ V} : n = 1.32$
 - $V = 0.77 \text{ V} : n = 1.29$

考察

SBM1045VSS は高電流向けのパワーショットキーダイオードであり，最大 10A の大電流に対応している．一方，1SS106 は小信号用で，通信や高速スイッチング用途を意識した設計となっている．両者とも整流特性を備えているが，以下のような違いが観察された．

- **逆方向特性**：両素子とも逆方向でのリーク電流が非常に小さく，高い並列抵抗 R_p を示した．とくに SBM1045VSS は $1.69 \times 10^8 \Omega$ と最も高い値を示し，接合面の品質が良好であることが分かる．
- **順方向導通性**：1SS106 の直列抵抗 $R_s = 26.55 \Omega$ は，SBM1045VSS よりも低く，小信号用途における効率的な導通特性があることを示す．
- **理想係数 n** ：両素子とも $1.0 < n < 1.5$ の範囲内にあり，ショットキー接合として理想的な指数的增加を示している．特に SBM1045VSS の低電圧領域では $n \approx 1.03$ を示し，非常に理想的な指数応答が確認された．

それぞれの特性は素子の設計思想に合致しており，SBM1045VSS は電源やパワー系統で，1SS106 は高速通信・スイッチング用途で真価を発揮する構造であると考えられる．

3.2 第2週：液体金属を用いたpn接合ダイオードの作製

目的

本実験では、真空装置や成膜装置を使用せずに、液体金属を用いて簡易的なpn接合ダイオードを作製する。一般にpn接合ダイオードは、真空中での蒸着やスパッタリングにより電極を成膜するが、これらの方法は装置が高価で、作製に多くの時間を要する。

本手法では、液体金属をSi基板上に直接塗布することで、電極形成を簡便かつ短時間で行い、実験的に動作するダイオード構造を構築する。

作製手順

① Siウェハの切り出し 作製に使用するSiウェハは、1.5 cm × 1.5 cm のサイズに切り出す。切断には ファインクリスタルカッター を用い、以下のようにして行った。

- ピカピカの鏡面（n型面）を下にしてろ紙の上に置く
- ファインクリスタルカッターで表面に傷をつける
- 上下を硝子盤で挟み、指で均等に押して割断する

使用した器具はすべて、イソプロピルアルコール（IPA）とキムワイプで清浄化し、次のものを用いた。

- ピンセット（非金属）
- ガラス盤
- 薬剤紙、ろ紙



図 3.6：基板切断の様子

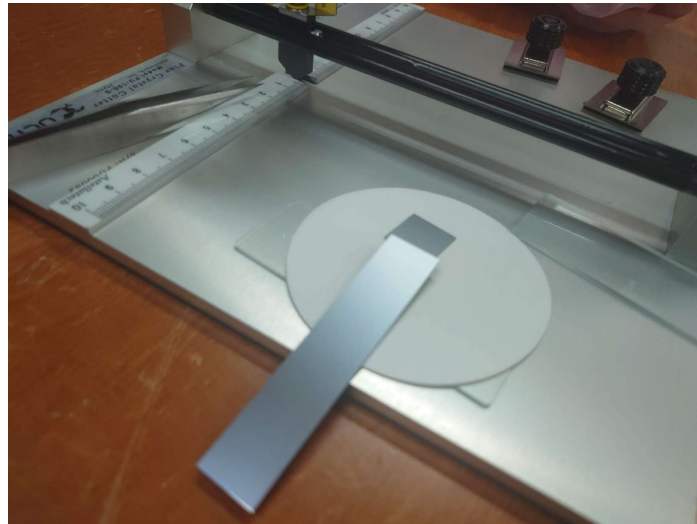


図 3.7 : 基板切断

① **基板の洗浄** 基板の洗浄は，接合界面の品質を確保するために極めて重要である．微粒子，金属汚染，有機汚染，イオン汚染，自然酸化膜などを除去するため，以下の工程で行った．

表 3.2 : 基板洗浄プロセス

工程	内容
(1)	Si 基板を台にセット
(2)	アセトンによる 5 分間の超音波洗浄
(3)	IPA による 5 分間の超音波洗浄
(4)	純水で 5 分間オーバーフロー洗浄
(5)	希フッ酸洗浄（酸化膜除去）
(6)	純水で 5 分間オーバーフロー洗浄
(7)	フローにより乾燥

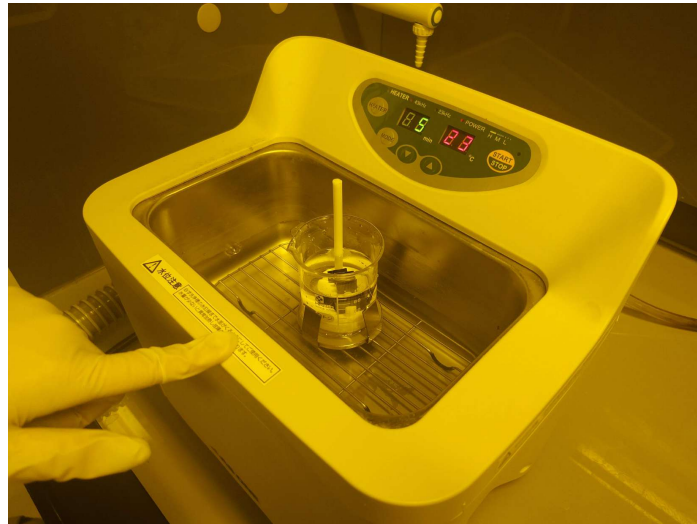


図 3.8 : 基板洗浄の様子

※ 希フッ酸は腐食性が高いため、ポリエチレン製の手袋とピンセットを使用して安全に作業を行った。酸化膜除去の目安は「基板表面が水をはじく状態」である。

② **液体金属による電極形成** 洗浄後の Si 基板に対して、以下の工程で電極を形成した (図 3.9 参照)。

1. Si 基板表面に金属マスクを設置
2. マスクの上に液体金属を滴下し、ヘラで塗布
3. 金属マスクをゆっくり剥がす
4. 銅板にも液体金属を塗布
5. シリコン基板裏面を銅板と接着
6. ダイオード構造が完成



図 3.9 : 液体金属による電極形成

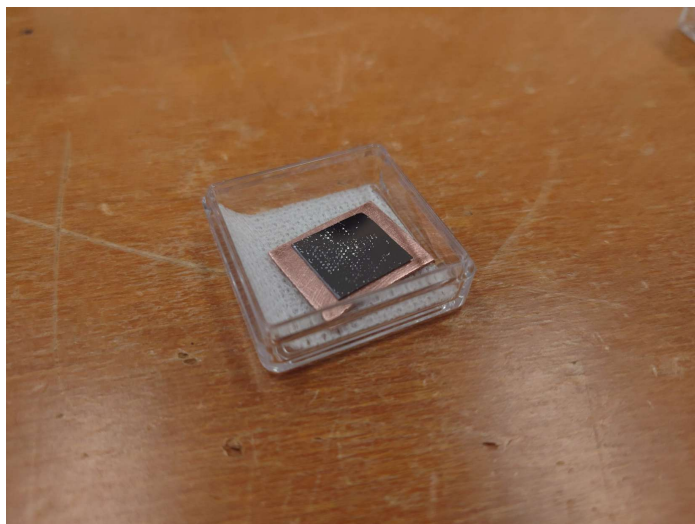


図 3.10 : 完成物の外観

注意点

- 銅板は使用前に表面を紙やすりで研磨し、酸化膜を除去する。
- Si 基板の「表面」(鏡面)と「裏面」(ザラザラ面)を間違えないこと。
- 銅板との接着時に圧をかけすぎると、液体金属が側面から溢れ、短絡する危険がある。はみ出した部分は吸い取っておく。



図 3.11 : 銅板を紙やすりで研磨

3.3 第3週目：液体金属 pn 接合ダイオードの測定

第2週目に作製した液体金属電極付き pn 接合ダイオードの整流特性を評価するため、直流電圧・電流源／モニタを用いて I-V 特性を測定する．特に熱処理（アニール）有無による特性の違いを確認する．

使用装置

- 直流電圧・電流源／モニタ：ADCMT 6240B
- 試料プロービング用ステージ
- 液体金属塗布 Si 基板（熱処理あり／なし）

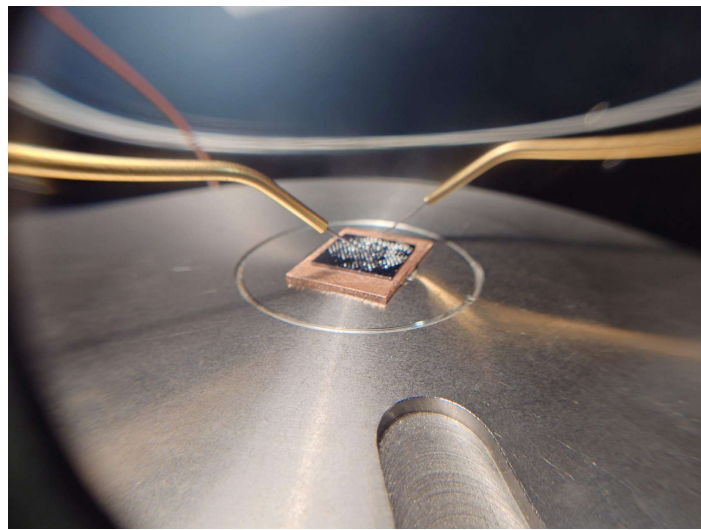


図 3.12：測定中の pn 接合ダイオード試料

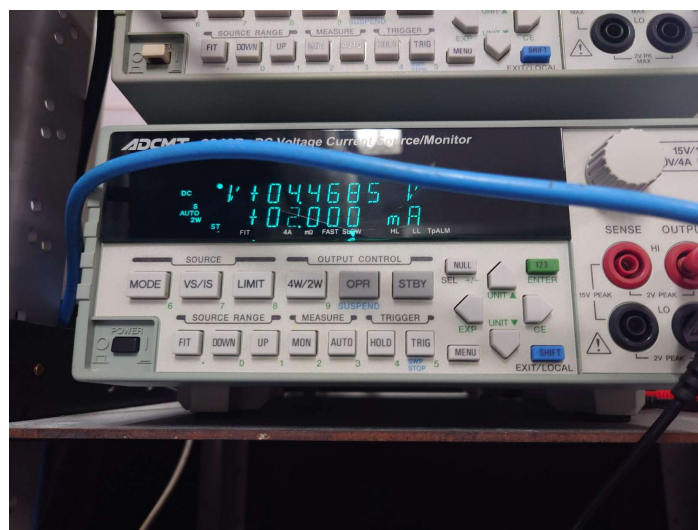


図 3.13：使用した測定装置（ADCMT 6240B）

実験手順

1. **試料設置**：液体金属で電極形成された pn 接合ダイオード試料（熱処理あり・なし）をプロービングステージ上に設置し、プローブを正確に接触させる。
2. **装置設定**：ADCMT 6240B の電圧レンジを設定し、測定対象に適したスイープ範囲（例：-1.0 V ~ 1.0 V）を決定。電流測定レンジも適宜自動設定とする。
3. **エイジング処理（初期通電）**：液体金属接触部の酸化膜除去と安定化を目的として、測定前に低電圧で連続的に電流を流す。この処理によって酸化膜が破壊され、安定した整流特性が得られるようになる（以下「エイジング」と呼ぶ）。
4. **I-V 測定**：エイジング完了後、DC スイープ電圧を加え、それに対する電流を測定することで I-V カーブを取得する。熱処理ありとなしの 2 つの試料で同様の測定を行う。
5. **データ記録とプロット**：測定されたデータは CSV 形式で記録し、後にプロットして整流特性、対称性、閾値電圧、リーク電流などを比較解析する。

測定パラメータ（VIG 設定）

スイープモード	DC
電圧範囲	-3.0 V ~ +2.0 V
ステップ電圧	0.005 V
電流リミット	0.002 A
測定レンジ	AUTO
測定モード	2 端子測定
ホールド時間	10 ms
パルス幅	25 ms

表 3.3：使用した測定条件（VIG 設定）

3.4 結果及び考察

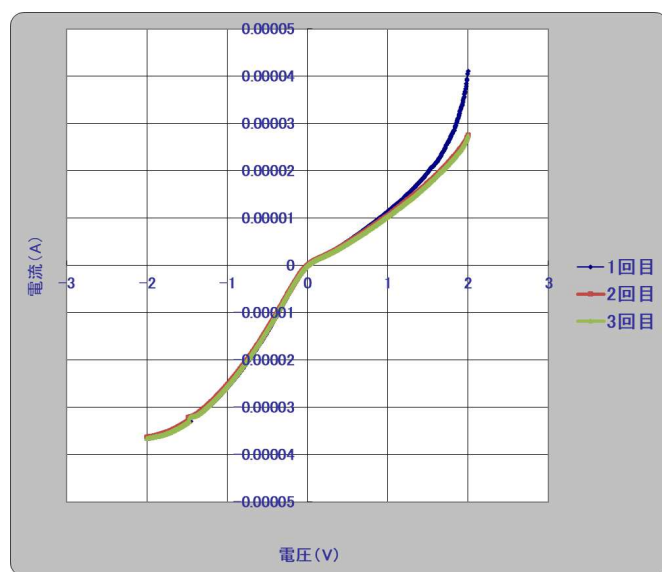


図 3.14 : I-V 測定結果 (熱処理あり)

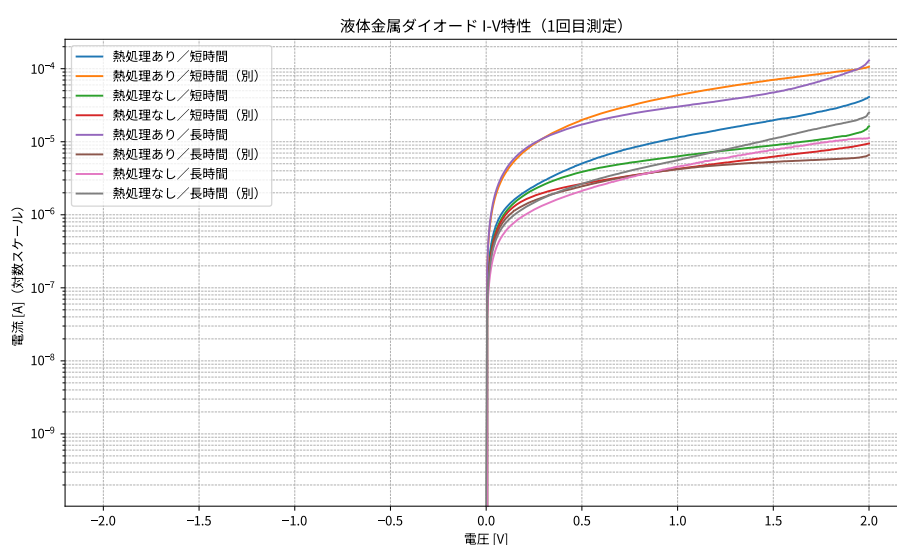


図 3.15 : 全員分の I-V 特性 (1 回目測定, 対数スケール)

図 3.14 に、熱処理を施した試料における I-V 測定結果を示す。測定範囲内では、電流値は 10^{-7} A 以下と極めて微小であり、理想的なダイオードに見られる急峻な立ち上がりは確認できなかった。特に 2 回目および 3 回目の測定においては、電流はほぼゼロとなり、ダイオードとしての整流特性は認められなかった。

一方で、1 回目の測定では微小ながら電流の増加が観測されたことから、事前に行ったエイジング処理が酸化膜の一部除去に寄与し、短時間的にキャリアの注入が可能になったものと考えられる。

図 3.15 は、全員分の 1 回目測定結果を対数スケールでまとめたものである。ここでも熱処理を

行った試料においては電流値が顕著に小さく、整流特性が見られなかった一方、熱処理を行っていない試料では、なだらかではあるが順方向の電流増加が確認された。この結果は、熱処理によって Si 基板および液体金属電極表面に形成された酸化膜が、キャリア注入の障壁として機能した可能性を強く示唆している。

また、液体金属の塗布厚さや基板との接触状態が試料ごとに異なることも、I-V 特性にばらつきが生じた一因と考えられる。とりわけ液体金属が基板の側面に回り込む現象や、表面に酸化物が残存することにより、意図しない電流経路や高い接触抵抗が発生した可能性も否定できない。

今後の改善点としては、熱処理条件の最適化だけでなく、酸化膜の除去プロセス（例：化学洗浄やプラズマ処理）の導入、および電極形成プロセスの均一性向上が挙げられる。これにより、液体金属を用いたダイオードの再現性および整流性能の向上が期待される。

参考文献

- 1) 新電元工業株式会社 技術資料(ダイオード編) - 新電元工業 https://www.shindengen.co.jp/products/semi/assets_mps/docs/TechDoc%28Diodes%29j.pdf, (参照：2025年8月8日)
- 2) ローム株式会社 ショットキーバリアダイオードとは？ https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/diodes/di_what5, (参照：2025年8月8日)

付 録

作成したプログラムを以下に示す.

A.0.1 パラメーター導出プログラム

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from scipy.stats import linregress
5
6 # --- フォント設定 (必要に応じて) ---
7 plt.rcParams['font.family'] = 'Noto Sans JP'
8
9 # --- 定数定義---
10 q = 1.602e-19 # 電気素量[C]
11 k = 1.381e-23 # ボルツマン定数[J/K]
12 T = 300 # 温度[K]
13
14 # --- データ読み込み---
15 df = pd.read_csv("nogu.csv", header=1)
16 df = df.iloc[:, :3] # 最初の列 (3No, V, ) I
17 df.columns = ["No", "V", "I"]
18 df = df.dropna(subset=["V", "I"]) # 欠損除去
19
20 # --- 測定範囲の表示---
21 print(f"電圧範囲: {df['V'].min():.2f} V ~{df['V'].max():.2f} V")
22 print(f"電流範囲: {df['I'].min():.2e} A ~{df['I'].max():.2e} A")
23
24 # -----
25 # 1. 並列抵抗 (逆方向領域) Rp
26 # -----
27 df_Rp = df[df["V"] < -0.1]
28 Rp = None
29 if len(df_Rp) >= 2:
30     slope_Rp, _, _, _, _ = linregress(df_Rp["I"].values, df_Rp["V"].values)
31     if slope_Rp > 0:
32         Rp = slope_Rp
33     else:
34         print△(" が負: 測定誤差やばらつきの可能性 Rp")
35
36 # -----
37 # 2. 直列抵抗 (リミッタ前、直線領域) Rs
38 # -----
39 df_Rs = df[(df["V"] > 0.25) & (df["V"] < 0.35) & (df["I"] < 0.002)]
40 Rs = None
41 if len(df_Rs) >= 2:
42     slope_Rs, _, _, _, _ = linregress(df_Rs["I"].values, df_Rs["V"].values)
43     if slope_Rs > 0:
44         Rs = slope_Rs
45     else:
46         print△(" が負: 直線領域の設定を見直すべき Rs")
47
48 # -----
49 # 3. 理想係数 (指数的增加領域) n
50 #  $\ln(I) \approx \ln(I_s) + (q / nkT) * V \rightarrow$  傾きからn を計算
51 # -----
```

```

52 df_ln = df[(df["V"] > 0.25) & (df["V"] < 0.35) & (df["I"] > 0) & (df["I"] < 0.002)]
53 n = None
54 lnI_mA = None
55 if len(df_ln) >= 2:
56     lnI_mA = np.log(df_ln["I"].values * 1000) # ln(mA)
57     slope_ln, _, _, _, _ = linregress(df_ln["V"].values, lnI_mA)
58     if slope_ln > 0:
59         n = q / (k * T * slope_ln)
60     else:
61         print(" 指数領域の傾きが負→計算不可n")
62
63 # --- 理想係数n の変化を計算---
64 voltage_ranges = [(0.15, 0.2), (0.2, 0.25), (0.25, 0.3)] # 電圧範囲を指定
65 n_values = []
66 voltage_centers = []
67
68 for v_min, v_max in voltage_ranges:
69     df_range = df[(df["V"] > v_min) & (df["V"] < v_max) & (df["I"] > 0)]
70     if len(df_range) >= 2:
71         try:
72             lnI_mA_range = np.log(df_range["I"].values * 1000) # に変換後 mAlog
73             slope_range, _, _, _, _ = linregress(df_range["V"].values, lnI_mA_range)
74             if slope_range > 0:
75                 n_range = q / (k * T * slope_range)
76                 # 値が異常に大きい場合は無効化
77                 if n_range < 10: # 理想係数n の範囲は通常~12
78                     n_values.append(n_range)
79             else:
80                 print(f"異常値検出": n = {n_range:.2f} 範囲 ( {v_min}-{v_max})")
81                 n_values.append(None)
82                 voltage_centers.append((v_min + v_max) / 2)
83             else:
84                 print(f"スロープが負またはゼロ": 範囲{v_min}-{v_max})")
85                 n_values.append(None) # スロープが負の場合は無効
86                 voltage_centers.append((v_min + v_max) / 2)
87         except Exception as e:
88             print(f"Error in range {v_min}-{v_max}: {e}")
89             n_values.append(None)
90             voltage_centers.append((v_min + v_max) / 2)
91     else:
92         print(f"データ不足": 範囲{v_min}-{v_max})")
93         n_values.append(None)
94         voltage_centers.append((v_min + v_max) / 2)
95
96 # --- 結果出力---
97 print("\n=== ダイオード解析結果 (回目測定) 1 ===")
98 print(f"並列抵抗" Rp = {Rp:.2f} Ω" if Rp else ": データ不足または異常 Rp")
99 print(f"直列抵抗" Rs = {Rs:.2f} Ω" if Rs else ": データ不足または異常 Rs")
100 print(f"理想係数" n = {n:.2f}" if n else ": データ不足または異常 n")
101
102 # --- 結果出力---
103 print("\n=== 理想係数n の計算結果===")
104 for center, n_val in zip(voltage_centers, n_values):
105     if n_val is not None:
106         print(f"電圧" {center:.2f} V: n = {n_val:.2f}")
107     else:
108         print(f"電圧" {center:.2f} V: 計算不可")
109
110 # --- グラフ描画---

```

```

111 plt.figure(figsize=(10, 4))
112
113 # (1) I-特性 (全体) V
114 plt.subplot(1, 2, 1)
115 plt.plot(df["V"].values, df["I"].values * 1000, 'o-', label="I-特性 V")
116 plt.xlabel電圧 (" V [V]")
117 plt.ylabel電流 (" I [mA]")
118 plt.title("I-特性 (回目測定) V1")
119 plt.grid(True)
120
121 # (2) ln(I[mA]) - V 特性 (指数的増加領域)
122 plt.subplot(1, 2, 2)
123 if lnI_mA is not None:
124     plt.plot(df_ln["V"].values, lnI_mA, 'o-', color='orange')
125     plt.title("ln(I[mA]) - V 特性 (指数領域) ")
126     plt.ylabel("ln電流 ( I [mA])")
127 else:
128     plt.text(0.5, 0.5, 指数領域データなし"", transform=plt.gca().transAxes,
129             ha='center', va='center')
130 plt.xlabel電圧 (" V [V]")
131 plt.grid(True)
132
133 plt.tight_layout()
134 plt.show()
135
136 # --- グラフ描画 (理想係数n の変化) ---
137 fig, ax = plt.subplots(figsize=(6, 4))
138 ax.plot(voltage_centers, n_values, 'o-', label="理想係数= n の変化")
139 ax.set_title理想係数 (" n の電圧依存性")
140 ax.set_xlabel電圧 (" V [V]")
141 ax.set_ylabel理想係数 (" n")
142 ax.grid(True)
143 ax.legend()
144
145 plt.tight_layout()
146 plt.show()

```