

タイトル	半導体教育用簡易pn接合ダイオードの作製と評価
著者	深沢，祐音；HUKAZAWA，Yuto；畠山，公平； HATAKEYAMA，Kohei；菅原，滋晴；SUGAWARA， Shigeharu
引用	北海学園大学工学部研究報告(53)：15-22
発行日	2026-01-09

半導体教育用簡易pn接合ダイオードの作製と評価

深 沢 祐 音*, 畠 山 公 平*, 菅 原 滋 晴*

Fabrication and Evaluation of a Simple PN Junction Diode for Semiconductor Education

Yuto HUKAZAWA*, Kohei HATAKEYAMA* and Shigeharu SUGAWARA*

要 旨

現代社会の基盤である半導体技術者の育成は喫緊の課題であるが、従来のデバイス作製実習は有毒物質の使用や大規模設備が必要なため教育現場での実践が困難であった。この課題を解決するため、安全かつ低コストでpn接合ダイオードを作製し、その教育的有効性を実証することを目的とした研究を行った。研究では、毒物や大規模設備を必要としない合金接合法を採用し、汎用半導体のn型Si基板とp型ドーパントの金属Inを用いることで作製から電気特性評価までを90分以内に完了できる簡易プロセスを確立した。また、安全性と再現性向上のため、Arガス雰囲気下で加熱処理を行う簡易雰囲気炉も開発した。作製した試料の電流－電圧特性を評価した結果、立ち上がり電圧約0.7V、順方向への指数関数的な電流増大という明確な整流特性を示し、pn接合の形成が強く示唆された。この簡易作製法は、学生がダイオードの最重要概念である整流特性を短時間で直感的に実体験することを可能にし、次世代半導体技術者の裾野を広げる新たな教育環境を提供する。

1 緒言

現代社会において、半導体は情報通信技術の発展を牽引する中核技術であり、我々の日常生活の隅々にまで深く浸透している。スマートフォンやパソコンといった消費者向け製品から、自動車の電子制御システム、医療機器、さらには地球規模の気候変動を監視する衛星まで、その応用範囲は枚挙にいとまがない。このような半導体の重要性の高まりに伴い、関連産業における人材育成は国家的な競争力を維持するための喫緊の課題となっている。特に、日本の産業

* 北海学園大学工学部電子情報工学科

* Department of Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

界では今後10年間で4万人規模の半導体技術者が不足すると予測されており、次世代を担う技術者として高校・大学生を育成することは極めて重要である。しかしながら、従来の半導体作製プロセスは厳格なクリーンルーム環境とAsやPH₃などの有毒物質の使用を伴うため、大規模な設備投資と徹底した安全管理が不可欠である。この現状は、教育現場で学生が半導体デバイスの製造プロセスを直接体験することを困難にする大きな障壁となっている。このため、pn接合などの半導体の基礎概念は座学に留まることが多く、学生がその本質を実際に体験し興味を持つ機会は限られてきた。

本研究の目的は、このような教育現場の課題を解決すべく、安全かつ低コストでpn接合ダイオードを作製し、その教育的有効性を実証することである。本研究では、毒物や大規模な設備を必要としない合金接合法を採用し、汎用半導体のSiと低融点金属のInという比較的扱いやすい材料を用いることで、1時間程度の短い時間で手軽にpn接合の原理を体験できるダイオード作製方法を考案した。また、作製したダイオードが整流特性を持つことを実験検証し、教材としての実用性を示した。

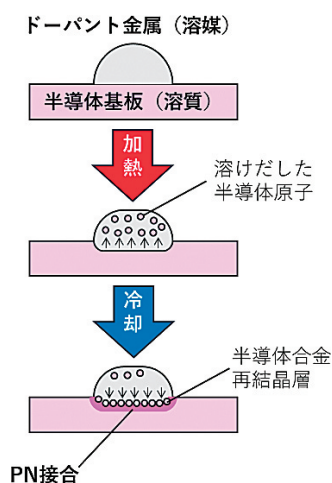
本論文は半導体教育の新たな可能性を提示し、持続可能な社会を支える半導体人材の裾野を広げるものである。

2 簡易pn接合ダイオード試料の作製

2-1 合金接合法

本研究で開発する簡易ダイオードのコンセプトは、半導体技術の核心であるpn接合を、教育用途において安全性と再現性の高い手法で実現することである。この目的を達成するため、複雑な工程を伴う従来の拡散プロセスに代わり、半導体初期のレガシー技術である合金接合法¹⁾を採用した。

合金接合法とは、半導体を溶質、反対の導電性を与えるドーパント金属を溶媒とするフラックス結晶成長を利用して、半導体の一部を反対導電性化し、pn接合を形成する手法である。その概要を第1図に示す。この方法では、半導体基板上に基板より低融点のドーパント金属の小片を配置し、高温に加熱して融解させる。融解したドーパント金属（溶媒）中に、半導体の一部が溶質として溶解する。その後、この溶液を徐々に冷却（徐冷）すると、半導体基板の溶解部に半導体溶質が再結晶化する。この再結晶層は、ドーパント金属が固溶した合金結晶であり、元の半導体基板とは反対の導電性を持つ。したがって、半導体基板と再結晶層の界面にpn接合が形成されることになる。



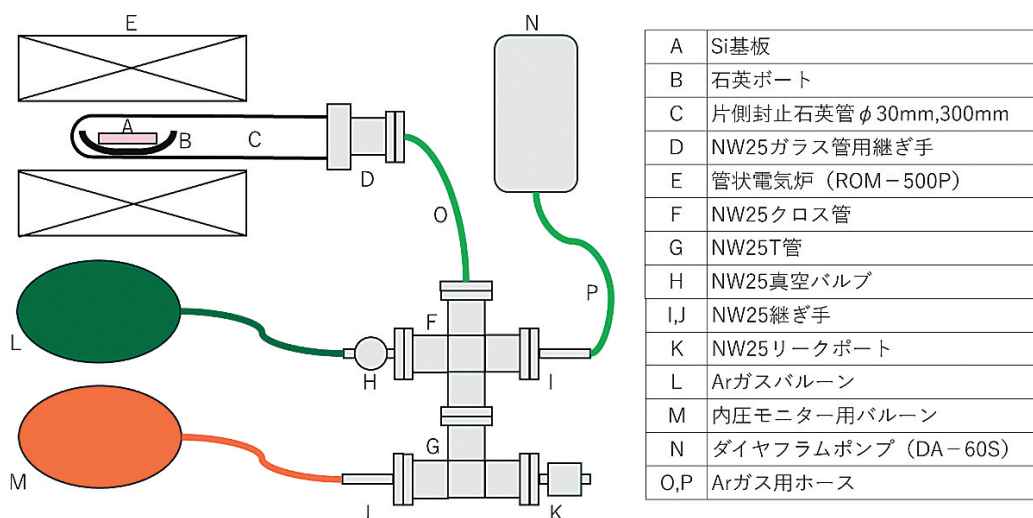
第1図 合金接合法。

本研究では、この原理に基づき、n形半導体Si基板と、p型ドーパントとなる金属Inを用いてpn接合の形成を試みた。

2-2 簡易雰囲気炉

教育目的での利用を考慮し、上記の合金接合法におけるInの加熱時に懸念される酸化物形成やヒューム発生といった危険性を排除することも本研究の重要なコンセプトである。この安全性の要求を満たすため、簡易雰囲気炉を開発した。本装置の概略図を第2図に示す。この簡易雰囲気炉は、電気炉、片側を封止した石英管（直径 ϕ 30mm、全長30cm）、石英管用NW25継ぎ手、およびガス交換システムで構成される。ガス交換システムは、ダイヤフラムポンプ、真空バルブ、各種真空配管部品などからなり、石英管内部の空気を不活性なArガスと置換することが可能となる。

本装置を用いることで、Ar雰囲気下での加熱プロセスを実施することが可能となり、Inの酸化や有害なヒュームの発生を抑制できる。さらに、半導体基板の加熱による酸化も抑制できるため、試料の品質維持およびpn接合作製における再現性の向上が期待できる。



第2図 簡易雰囲気炉装置の構成概要。

2-3 試料作製

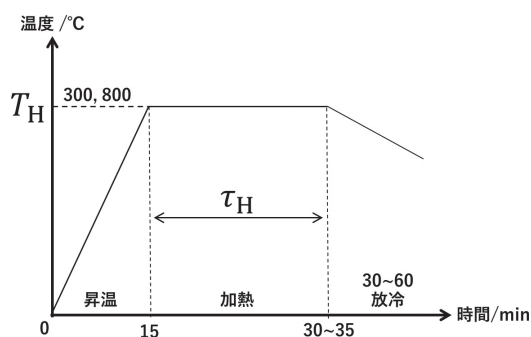
本研究で実施した簡易pn接合ダイオード試料の作製手順を以下に示す。まず、n型Siウェハからダイヤモンドペンを用いて1～2cm角程度の基板を切り出す。教育における安全性の観点からフッ酸（HF）を用いることはできないため、基板表面の自然酸化膜は除去せずにそのまま用いる。次にドーパント金属Inを基板上に塗布する。In線材を約5mm程度に切り出し、温度200℃～250℃程度に設定したはんだコテを用いて基板上に塗り広げるようにして設置す

る．この操作は，Inと基板の接触面積が最大となるように意図したものである．続いて，合金接合プロセスを行う．基板を開発した簡易雰囲気炉の石英管内中央位置にある石英ポート内に設置する．管内は，まず30分程度減圧した後，Arガスを導入して雰囲気置換する．その後，電気炉を操作して管内の温度を制御し，基板に対して合金接合法を実行することで試料を作製する．加熱プロセス完了後，石英管内が十分に冷却されたことを確認した後，試料を取り出す．

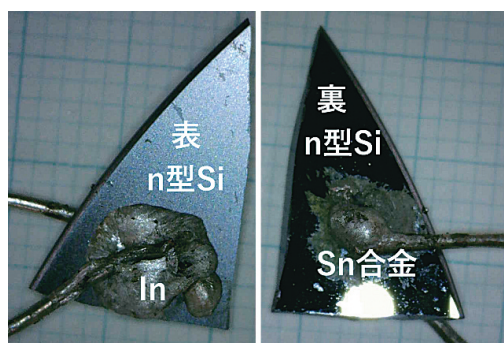
2-4 実験

本研究では，第3図に示す温度ダイアグラムに従い，合金接合法を実施した．作製プロセスにおいて，加熱温度 T_H と加熱時間 τ_H の条件を， $T_H=300^\circ\text{C}$ ， $\tau_H=15\text{min}$ （低温試料）および $T_H=800^\circ\text{C}$ ， $\tau_H=20\text{min}$ （高温試料）とする二種類の試料を作製した．

作製に用いたSiウェハは，厚さ0.5mm，n型，表面方位（111）の信越化学工業株式会社製のものを使用した．p型ドーパント金属として用いたIn線材は，直径 ϕ 1 mm，株式会社ニラコ社製のものを使用した．作製した試料の例を第4図に示す．



第3図 合金接合法の温度ダイアグラム．



第4図 合金接合法で作製した試料写真．

試料を計測器へ接続するための電極は以下の通り作製した．p側電極は基板表面に再固化したInをそのまま電極として使用した．n側電極はSn合金（セラソルザ217，株式会社コムラテック社製）を基板裏面に超音波はんだ付けして電極とした．各電極にはリード線を通常のはんだを用いて取り付けた．

作製した試料の評価として，整流特性を調べる実験を行った．実験では，横河計測株式会社製のマルチソースメジャーユニットGS820を用いて電流－電圧（ I - V ）特性を測定した．

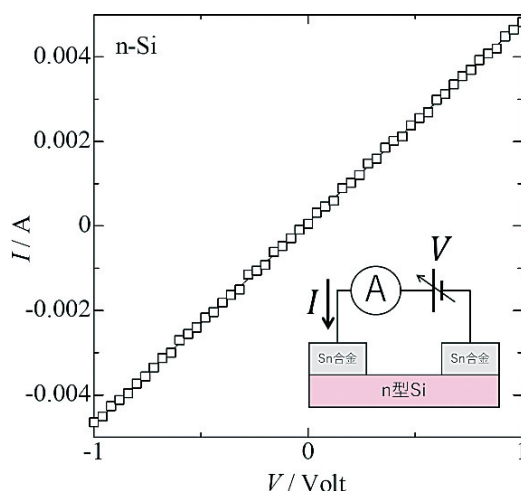
ここで試料に取り付けた電極のオーミック接触の確認について述べる．pn接合の形成を目的とする本研究において，各電極がSiに対してショットキーバリアを形成せずにオーミック接触となっているかどうか，正確なpn接合特性を評価する上で重要となる．n側電極（Sn合金）については，第5図に示すように， I - V 特性の実験結果から，Sn合金はn型Siに対してオー

ミック電極となることを確認した。一方、p側電極(In)については、p型に再結晶化した半導体との電気的な接触状態を直接実験で調べることは困難であった。しかし、作製した試料の I - V 特性の実験結果(次章)を踏まえ、以下のようにオーミック電極であると結論付けた。一般的にInの仕事関数はp型Siの電子親和力よりも大きいいため、接触面にはショットキーバリアが形成される。このとき、Inとp型再結晶半導体で形成されたショットキー接合をダイオードとして見ると、In側がカソードとなる。一方、作製を意図したpn接合ではn側がカソードである。もしInがショットキー電極として機能する場合、pn接合とInのショットキー接合が対向するように直列接続され、印加電圧に応じて電流が流れない(または降伏電圧を超えるまで極めて流れにくい)特性を示すはずである。しかし、次章で示すように、作製した高温試料は明確な整流特性を示した。このことから、pn接合形成後のIn電極は、p型Si再結晶層との間に抵抗性の低いオーミック接触を形成していると判断した。

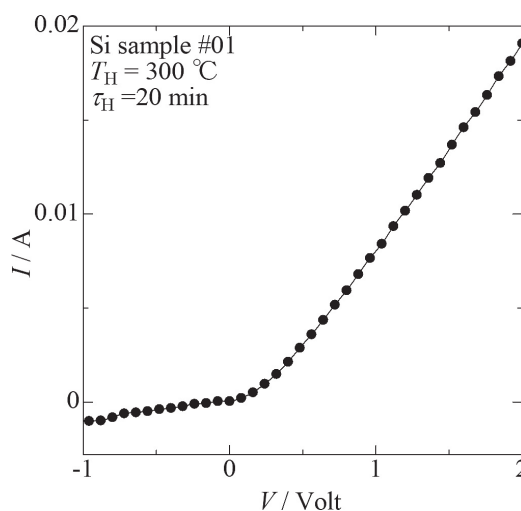
3 実験結果と議論

合金接合法において、低温処理により作製した試料($T_H = 300^\circ\text{C}$, 以下、低温試料)の I - V 特性を第6図に、高温処理を行った試料($T_H = 800^\circ\text{C}$, 以下、高温試料)の特性を第7図にそれぞれ示す。両試料の特性は、加熱時間と温度に依存し大きく異なることが明らかとなった。

第6図に示される低温試料の順バイアス特性は、電流の立ち上がり電圧がほぼ0Vであり、印加電圧に比例して電流が増加する傾向を示す。逆バイアス電圧に対する逆電流の大きさは順電流に比べて小さく、絶対値1Vの電圧に対して比較した場合、逆電流の大きさは順電流の約1/4倍程度に留まる。この特性



第5図 n型Si基板の I - V 特性. 内挿図は測定回路図である. Sn合金電極を通して流れる電流はオームの法則に従う.



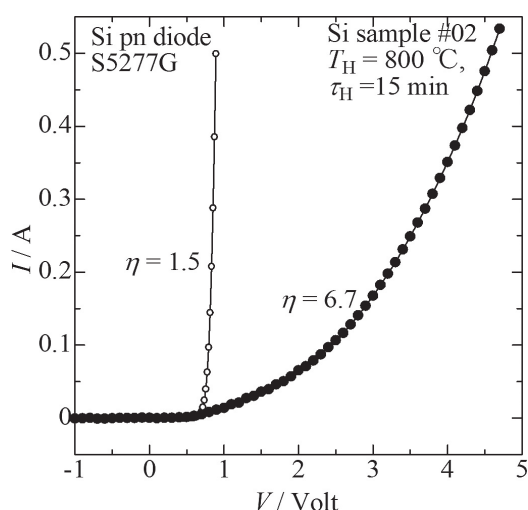
第6図 低温試料の I - V 特性.

から、低温試料にも一定の整流性は認められる。しかしながら、この立ち上がり電圧は、一般的なSiのpnダイオードの標準値（0.6～0.8V）と比較して著しく低く、ショットキーダイオードの値（0.2～0.5V）に近い値である。また、順バイアス電圧に比例して増加する電流の挙動は、pn接合ダイオードにおける指数関数的な非線形増大という一般的な特性とは異なる。したがって、低温試料はpn接合としての理想的な整流特性をほとんど示していないと判断される。これは、低温でのInに対するSiの溶解度が低いと、pn接合を形成する上で不可欠なp型Siの再結晶化が不十分であったことに起因する。この結果、低温試料の I - V 特性は、単にInとSiが接触したことによるショットキー接合の性質が強く反映されたものと考えられる。

一方、高温試料（第7図の黒丸のデータ）は顕著な整流特性を示す。具体的には、順方向への立ち上がり電圧が約0.7V付近で観測され、これはSiのpn接合の形成を示唆する。また、絶対値1Vにおける順電流と逆電流の比は約20:1であり、これは整流作用を示している。さらに、順バイアス電圧に対して順電流が指数関数的に非線形な増大を示し、これはダイオードの一般的な挙動である。この結果は、低温試料と比較して、高温試料においては明確に異なる接合状態が実現されており、pn接合が形成されたことを強く示唆するものである。

作製されたpn接合は、下記の通り、理想的なダイオードの特性には及ばないが、整流特性や立ち上がり電圧といったダイオードの主要な概念を学習する上で十分な結果である。特筆すべきは、本研究で採用した簡易的な作製手法では、試料作製の準備から電気特性の評価までを90分以内に完了できる点である。これにより、従来の半導体作製実習のような長時間を要することなく、ダイオードの最も重要な概念である整流特性を学生が実験できる授業を実現可能となった。これは、半導体教育における実験の即時性と概念の直感的な理解を大幅に向上させるものである。

高温試料により形成されたpn接合の状態を定量的に評価する。比較のため、市販のSiのpnダイオード（S5277G）の整流特性を第7図に白抜き丸のデータで示す。高温試料の整流特性は、順方向への立ち上がり電圧などにおいて市販品（S5277G）の特性に近い挙動を示すが、順電流の増加率が著しく小さい点が異なる。この結果は、高温試料のpn接合が理想的な状態ではないことを示している。pn接合の状態を定量的に調べるため、 I - V の関係を示す実験式²⁾を



第7図 高温試料（黒丸データ）と市販ダイオード（白抜き丸データ）の I - V 特性。

データに適用する：

$$I(V) \propto e^{V/(\eta V_T)}$$

ここで、 η は理想係数、 V_T は室温 $T_R = 300\text{K}$ における熱電圧 $k_B T_R / e = 26\text{mV}$ である。理想係数 η はpn接合の状態を表す重要なパラメータである。一般に η が1に近い場合、拡散電流に支配された理想的なpn接合ダイオード特性を示す。また、欠陥を多く含む接合において、空間電荷領域でのキャリア再結合が支配的になると、 η は2に近い値となる。第7図の特性曲線の指数関数依存部分から、高温試料の理想係数 η を見積もった結果、 $\eta = 6.7$ となった（S5277Gでは $\eta = 1.5$ ）。この結果は、高温試料のpn接合が、再結合中心となる多くの欠陥を含み、キャリアの多重トラップ状態などが存在する非常に複雑な非理想的状態になっていることを強く示唆する。

合金接合法では、融液からの再結晶化プロセスにおいて、基板が急冷されるとpn接合界面に結晶欠陥が導入されることが知られている。本研究のプロセスでは、再結晶化の際に電気炉の温度制御を行わず自然放冷に委ねているため、接合部に多くの欠陥が導入されている可能性が高い。試料作製に要する時間は増加するが、十分に時間をかけて徐冷し、緩やかに再結晶化を進めることにより、理想係数が改善したより理想に近い特性の試料を得ることが可能になると考えられる。

4 まとめ

本研究は、従来の半導体製造実習が抱える安全性とコストの課題を解決し、学生がpn接合の基礎概念を体験的に学習するための簡易pn接合ダイオード作製手法を開発し、その教育的有効性を実証した。毒物や大規模設備を必要としない合金接合法を採用し、n型Si基板とInを用いて、作製から電気特性評価までを90分以内に完了できる短時間プロセスを確立した。また、安全性の確保と再現性の向上のため、Ar雰囲気加熱処理が可能な簡易雰囲気炉を開発した。作製した試料の電気特性評価の結果、最適な条件（高温試料）で形成された接合が、Siのpn接合を示す立ち上がり電圧（約0.7V）と、指数関数的な電流増大という明確な整流特性を示すことを確認した。この結果は、開発した簡易手法が、ダイオードの最重要概念である整流作用を学生が直感的に理解するための教材として、十分な実用性を有することを証明するものである。今後の課題として、作製されたダイオードが非理想的な特性（理想係数 $\eta = 6.7$ ）を示したことから、合金接合プロセスにおける徐冷条件を最適化し、より理想に近い特性の試料を得る可能性を探る。本研究の手法は、半導体の基礎原理の実践的学習機会を提供することで、次世代技術者の興味と理解を深め、半導体人材の裾野を広げるという教育的な目標達成に大きく貢献するものである。

謝 辞

本研究は、R 6 - 7 年度北海学園学術研究助成総合研究（代表：藤原英樹，研究課題：教育用「半導体ミニファクトリー」の開発と実践応用）の助成を受けて実施したものである。ここに記し、心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 加藤宏, 阿部敏雄: 電気化学および工業物理化学, 34 (1966) 994.
- 2) S. M. Sze : Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1978, p.95.