

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：54301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K02937

研究課題名（和文）シリコンダイオード教材を用いた教育プログラムの構築と実践

研究課題名（英文）Development and practice of educational programs using silicon diode teaching materials

研究代表者

内海 淳志（Utsumi, Atsushi）

舞鶴工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：30402663

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：半導体デバイスを学習するための実験教材として、液体金属をショットキー電極に用いたショットキーダイオードを提案している。このダイオードは、蒸着装置やスパッタ装置などの製造装置を使用せずに作製できるため、大学や高専の半導体実験室以外で作製実験を行うことができる。本研究では、これまでに開発した短時間で作製可能なショットキーダイオード教材の改良を進めるとともに、この教材を使用した教育プログラムを開発し実践した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、世界的に半導体デバイスの需要が高まっており、その開発を担うエンジニア・研究者の育成が求められている。しかし、半導体デバイスを理解することは容易ではない。見て触って理解することを重視した非常に有効な教育方法として、学生自身の手で実物を作製して測定する実験実習があるが、半導体デバイスの作製実験を実践している大学や高専は少ない。この理由としては、半導体デバイスの作製に多くの時間を要することや、複数の製造装置を必要とすることが挙げられる。本研究では、これまでに開発した短時間で作製可能なシリコン太陽電池教材の改良を進めるとともに、この教材を使用した教育プログラムを開発した。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a Schottky diode using liquid metal as a teaching material for experiments to study semiconductor devices. Since these diodes can be fabricated without the use of deposition or sputtering equipment, fabrication experiments can be conducted outside of semiconductor laboratories such as KOSEN or universities. In this study, we will improve the Schottky diode teaching material that can be fabricated in a short time that we have developed so far. We also developed and implemented an educational program using this teaching material.

研究分野：半導体工学

キーワード：教材開発 半導体教育 ダイオード 液体金属

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、世界的に半導体デバイスの需要が高まっており、その研究開発を担う研究者・エンジニアの育成が求められている。このような状況の中、電気・電子工学を専攻する学生にとって、集積回路や太陽電池などの半導体デバイスの動作原理およびその作製工程を理解することは重要になっている。しかしながら、半導体工学などの授業、特に座学のみでこれらを理解することは容易ではない。見て触って理解することを重視した有効な教育方法として、学生自身の手で実物を作製して測定する実験実習があるが、半導体デバイスの作製実験を実施している大学や高専は少ない。この理由としては、半導体デバイスの作製に多くの時間を要することや、複数の製造装置を必要とすることが挙げられる。そこで、我々は図 1 に示す工程で作製できるショットキーダイオード教材を提案している。ダイオードの電極に液体金属を用いることで、これまで電極の形成に使用していた蒸着装置やスパッタ装置を不要にした。結果として、3 時間かかっていたダイオードの作製時間を 40 分(この内の 30 分間は、シリコン基板の洗浄および酸化膜除去)に短縮することができた[1]。しかし、この教材を用いた実験実習の教育効果が検証できていないため、急ぎ検証を進める必要がある。

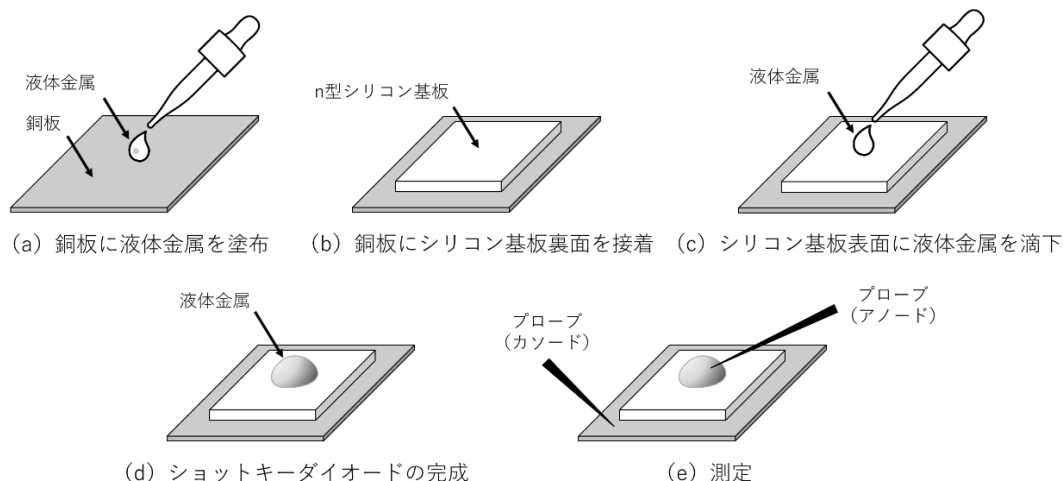


図 1 液体金属を電極としたショットキーダイオードの作製工程

2. 研究の目的

我々は、作りやすくわかりやすい半導体デバイス教材として、液体金属を電極とするショットキーダイオードを提案し試作した。この教材を大学・高専に広く普及させるためには、教育プログラムの構築およびその教育効果の検証が必要不可欠であり急務である。そこで本研究の目的は、開発したダイオード教材を用いた教育プログラムを構築し、その教育効果を検証することである。

3. 研究の方法

(1) 教育プログラムの構築とその教育効果の検証

このショットキーダイオードを教材とした半導体デバイス作製実験の教育プログラムの構築とその教育効果の検証は、舞鶴工業高等専門学校(以下、舞鶴高専)の実験実習で行った。この実験実習において、教育プログラムの設計、実施、評価および改良を 3 年間に渡って繰り返すことで、実用可能な教育プログラムを構築する計画である。年度が進む中では、受講した学生のアンケートを元に、実験実習で用いるテキスト、資料および教授方法を改善した。また、より使いやすい教材になるように、ダイオード教材の改良を同時に進めた。実験実習の実施場所は、舞鶴高専地域共同テクノセンターの講義室および電子デバイス実習室(試作室)を利用して作製したが、最終年度は学生実験室でのデバイス作製を試みた。

(2) ショットキーダイオード教材の改良

教材の改良内容は大きく 2 つに分かれる。まず 1 つ目は、シリコン基板の洗浄および酸化膜除去工程の改良である。より使いやすい教材とするために、またより短時間での作製を実現するために必要な検討である。2 つ目は、作製したダイオード特性のばらつきを無くすための改良である。この問題は、ショットキーダイオード教材を用いた実験実習を実践する中で見つかったものであり、問題解決に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 教育プログラムの構築とその教育効果の検証

2021 年度は、舞鶴高専の専攻科 1 年生 11 名(半導体工学を学習済みの 20~21 歳の学生)を

対象として、ダイオード作製実験を実施し、その教育効果の検証を行った。具体的には専攻科の特別実験において、ダイオード作製実験およびその電流電圧特性の評価と解析をした。事前事後には、学生に対して授業アンケートを実施して教育効果の検証を行った。結果として、半導体デバイスへの理解が深まったとの意見は多く、一定の教育効果が見られた。しかし、作製したダイオードの電流電圧特性に比較的大きなばらつきが見られたことから、教材の改良点として次年度の課題となった。

2022年度は、舞鶴高専の専攻科1年生8名を対象として、2回目のダイオード作製実験を実施した。前年度からの変更は、説明に用いる資料の改訂が主であった。わかりやすい説明資料が準備できたこともあり、半導体デバイスへの興味が高まったとのアンケートへの回答が増え、教育効果の向上が確認された。

2023年度は、舞鶴高専の専攻科1年生6名を対象として、3回目のダイオード作製実験を実施した。作製プロセスを単純化し、学生実験室で作製実験ができるように変更した。結果として、より短時間でダイオードの作製が可能となり、測定やデバイスの動作原理の説明に時間を割り当てることができた。また、アンケートにおいても、半導体デバイスの作製プロセスおよび動作原理への理解が深まったとの回答が多く、効果的な教育が実践できたものと考えられる。



図1 銅板上への液体金属の滴下

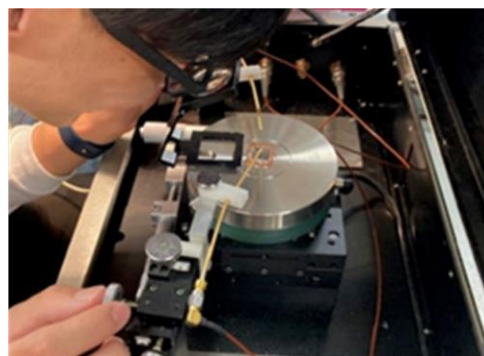


図2 プローバを用いたダイオードの測定

(2) ショットキーダイオード教材の改良

2021年度は、シリコン基板の洗浄および酸化膜除去について工程の改良を進めた。液体金属をシリコン基板に直接塗布する場合、非常に薄い自然酸化膜であればシリコン表面に残存していたとしてもダイオードの作製が可能であることがこれまでの開発過程でわかっており、今年度は酸化膜を除去せずに作製したダイオードの電流電圧特性やそのばらつきについて評価をした[2]。結果として、フッ酸を用いて酸化膜を除去する工程を外すと、安定したダイオードの電流電圧特性を得ることができないことがわかった。このため、基板洗浄・酸化膜除去のプロセスについては引き続き改良を行うことにした。

2022年度はダイオードの電流電圧特性のばらつきを抑えるための改良を主に進めた。2021年度のダイオード作製実験(専攻科生による実験実習)の結果、デバイスの電流電圧特性に比較的大きなばらつきが見られたからである。このばらつきの原因の一つとして、電極形状が不安定であることが挙げられ、解決するために液体金属を改良することにした。具体的には、液体金属が変形しやすいため、形成した電極形状が不揃いであったり、測定時に電極形状が崩れたりする。そこで、塗布による電極形成時には液体でありながら、測定時には固体化する液体金属を開発した。融点を高くするため、液体金属の組成を調整し、同時に試作した液体金属の電気抵抗、およびそれをダイオードの電極として使用した際の電流-電圧特性の評価を行った。開発した液体金属は、融点を上げることで取り扱いがしやすく、組成を調整する前の液体金属と比較しても同等の電気的特性を有していることがわかった。

2023年度には、電極形成時には液体でありながら、測定時には固体化する液体金属について評価を進めた。この液体金属は、前年度デバイス毎の特性のばらつきを抑えるために開発したものである。デバイスを作製した後の電流電圧特性の測定から、ばらつきが抑えられていることが確認されたため、ダイオード作製実験に適用可能であることがわかった。

<引用文献>

- [1] 萩原隆仁, 内海淳志, 液体金属を用いたショットキーバリアダイオードの開発, 第67回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 14a-Pa1-30, 2020
- [2] 内田 竣也, 熊谷 昌城, 内海 淳志, 液体金属を用いたショットキーバリアダイオードの改良, 第69回応用物理学会春季学術講演会予稿集, 26a-P02-8, 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 熊谷昌城, 田邊雅翔, 久木弘成, 内海淳志
2. 発表標題 レーザアニール法を用いた表面プラズモンフィルタの試作
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内田竣也, 熊谷昌城, 内海淳志
2. 発表標題 液体金属, 金, アルミニウムを各ショットキー電極とするダイオードの電気的特性の比較
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田竣也, 熊谷昌城, 内海淳志
2. 発表標題 液体金属を用いたショットキーバリヤダイオードの改良
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石川 一平 (Ishikawa Ippei) (10511735)	舞鶴工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (54301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------