

令和 4 年 5 月 8 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03174

研究課題名(和文)半導体製造装置やフッ酸を使わない教育用シリコン太陽電池製作に関する研究

研究課題名(英文) Study on manufacturing silicon solar cells for education that does not use semiconductor manufacturing equipment or hydrofluoric acid

研究代表者

安森 偉郎 (Yasumori, Yoshio)

東海大学・教育開発研究センター・准教授

研究者番号：50369451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：半導体製造装置をほとんど備えていなくても、通常の実験室のような環境において太陽電池の製作実習を実施する方法について研究した。

その結果、太陽電池の製作からソーラーモータ駆動までを2コマで実施する方法を考案した。さらに、熱拡散時間を短くした場合の太陽電池特性の低下について調べたところ、拡散時間を短くすると太陽電池特性低下の要因となるリーク電流が増加することが整流特性における逆方向特性から明らかとなった。拡散時間を短くすると合金によって不完全な接合部となる箇所が増えるためリーク電流が増加すると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地球温暖化への懸念などによってエネルギー問題への関心が高まり再生可能エネルギーの1つとして太陽電池は注目されている。研究代表者は、半導体製造装置をほとんど備えていなくても、通常の実験室のような環境において太陽電池の製作実習を実施する方法について研究した。太陽電池の製作からソーラーモータ駆動までを2コマで実施する方法を考案し、その結果、学期中の学生実験等への導入が時間的に可能となることがわかった。このことから、多くの学生等に太陽電池製作からモータ駆動までを体験させることができ、太陽光発電の原理や半導体物性を深く学ぶきっかけとなると期待される。

研究成果の概要(英文)： I researched how to carry out solar cell manufacturing training even if I do not have a semiconductor manufacturing device.

As a result, we devised a method to carry out from the production of solar cells to the drive of solar motors in two frames. Furthermore, when the deterioration of the solar cell characteristics when the thermal diffusion time was shortened was investigated, it became clear from the reverse direction characteristics in the rectification characteristics that the leakage current, which causes the deterioration of the solar cell characteristics, increases when the diffusion time is shortened. It was thought that if the diffusion time was shortened, the leakage current would increase because the alloy would increase the number of incomplete joints.

研究分野：複合領域

キーワード：太陽電池 エネルギー 学生実験 教育 半導体 シリコン 半導体製造装置

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、地球温暖化やエネルギー問題への関心が高まり再生可能エネルギーの1つとして太陽電池は注目されている。太陽電池の製作実習では、製作後に太陽光を照射するとモータが実際に駆動するので、学生・生徒に非常に強い関心を持たせることができる。

(2) 太陽電池などの半導体デバイス製作実習では、設備が十分整った環境が求められるため、多くの学生にデバイス製作を経験させることが難しいという課題がある。

2. 研究の目的

(1) 半導体製造装置をほとんど備えていなくても、通常の実験室のような環境において太陽電池を製作する方法について研究をしてきている。この研究過程において半導体製造装置やHF酸水溶液などを使わずに、ソーラーモータを駆動させることのできる実験教材用シリコン太陽電池を製作する方法を開発した。

(2) 一般に大学等の学生実験は2コマで実施されるため、この時間内に製作できれば学期中の学生実験への導入が容易となる。そこで、本研究では製作時間の短縮化を目的として太陽電池の製作方法の改良に関する研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 太陽電池の製作工程における不純物拡散溶液の濃度や拡散時間について調べ、さらに裏面の酸化膜除去の方法を改良するという方法により研究を遂行した。

(2) 熱拡散時間を短くした場合に太陽電池特性は低下する。この低下についての知見を得るために、太陽電池の整流特性および表面の光学顕微鏡像からその原因について調べた。

4. 研究成果

(1) 拡散時間による太陽電池特性

本研究における太陽電池では、製作からソーラーモータ駆動までの時間を見積ると3コマ程度を要する¹⁾。大学等の学生実験は、一般に2コマ(3時間:1コマ90min×2)で実施されることが多い。そこで2コマで太陽電池製作からソーラーモータ駆動までを実現する方法について検討した。太陽電池製作において、p型拡散層を形成する際の拡散時間をこれまで60minとしていたが、最適な拡散時間を検討することで製作時間を短縮できると考えられる。そこで拡散時間を5, 10, 20, 30, 60, 80minとし、拡散時間のそれぞれ異なる太陽電池を製作し太陽電池特性を調べた。その他の条件では、不純物拡散源B₂O₃を140mg、拡散温度を1100℃とした。

様々な拡散時間により形成した際のp型拡散層の深さはスフェリカルドリル法によって調べた。この方法は、はじめにSi基板表面に半球状の窪みを形成し薬品処理によってp型拡散層だけを着色させ、ニュートンリングにおける計算法を応用することによって拡散層の厚みを見積もるという手法である。

図1に示すようにp型拡散層の深さは、拡散時間80minでは2.8μm、5minでは0.49μmと拡散時間が短時間になるにつれてその深さが浅くなることわがわかる。

拡散時間に対する太陽電池特性を図2に示す。図2(a)に示すように、拡散時間を短くしていくと10minでは短絡電流I_{sc}は最大180mAとなることがわかった。図5に示したように拡散時間が短時間になるにつれてp型拡散層の深さが浅くなることから、10minまでのI_{sc}の増加は空乏層に光が到達しやすくなるためと考えられる。拡散時間をさらに短くし、5minではI_{sc}はこれまでとは反対に低下している。このとき拡散層は0.49μmとさらに薄くなっている(図1)、拡散時間5minでは拡散開始の初期であるため、

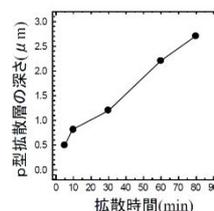


図1 拡散時間に対するp型拡散層の深さ

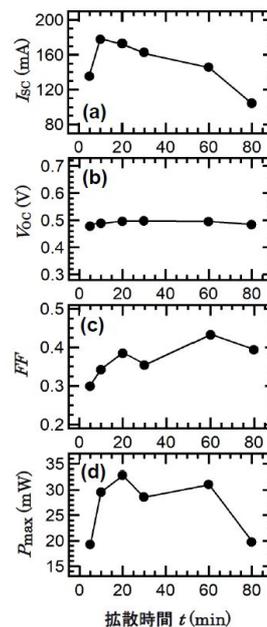


図2 拡散時間による太陽電池特性

(a)短絡電流 I_{sc} , (b)開放電圧 V_{oc}
(c)曲線因子 FF , (d)最大出力 P_{max}

拡散層は微視的に細かい凹凸を有する不均一層となっている可能性がある。そのことが I_{sc} の低下と関係していると推測される。また、図 2(c)の曲線因子 FF の拡散時間に対する減少も拡散層の厚みと関連があると推測される。また、同図(b)の V_{oc} は拡散時間に対してほとんど変化していないことが確認できる。(d)の最大出力 P_{max} は短絡電流 I_{sc} と類似の傾向を示していることがわかる。

本実験で製作した拡散時間の異なる太陽電池では、 I_{sc} は 50mA 以上であり、すべてソーラーモータ (H158) を駆動させることができた。製作時間の短時間化と確実なソーラーモータの駆動を勘案すると、拡散時間は 10 min が適切であることがわかった。

(2) 作時間を短縮化した製作工程

B_2O_3 の溶解量を 140 mg、拡散時間 10 min の条件下で太陽電池を製作することにより、短絡電流 I_{sc} は 180 mA となることがわかった。ソーラーモータ (H158) は I_{sc} が 50 mA 以上あれば駆動させることができることから、Si 基板をさらに小さくして太陽電池を製作してもソーラーモータが駆動すると期待される。そこで従来の直径 10 cm の半円状 Si 基板を更に半分とし、半径 5 cm の扇型 Si 基板 (4 インチ Si ウエハの 1/4) を用いて太陽電池を製作した。その結果 I_{sc} は 80 mA となり、ソーラーモータ (H158) を駆動させることができた。Si 基板のサイズを従来の半分にする事で、製作作業における基板の扱いが格段に容易となるため製作時間の短縮化の一助となる。

半導体製造装置やフッ酸を使わずに教育用 Si 太陽電池を製作した。基板サイズを半径 5 cm の扇型、 SiO_2 コーティング剤に溶解する B_2O_3 を 140 mg、熱拡散時間を 10 min として太陽電池を製作したところ、短絡電流 I_{sc} は 80 mA であり、ソーラーモータを駆動させることができた。太陽電池の製作からソーラーモータ駆動までを 2 コマで実施する方法を考案し、その結果、学期中の学生実験等への導入が時間的に可能となることがわかった。このことから、多くの学生等に太陽電池製作からモータ駆動までを体験させることができ、太陽光発電の原理や半導体物性を深く学びきっかけとなると期待される。

(3) 拡散時間による太陽電池特性

太陽電池計測システムを用いて測定された太陽電池の $I-V$ 特性を図 3 に示す。同図 (a) は HF 処理試料、(b) はルータ処理試料であり、図中の時間は太陽電池製作の際の拡散時間である。 $I-V$ 特性は全て類似した特性の形状が得られているが、拡散時間が 3min の試料では 0.3V 付近の $I-V$ 曲線が特に緩やかになっていることがわかる。この $I-V$ 特性を基に太陽電池計測システムによって自動計測されたルータ処理試料および HF 処理試料の各太陽電池特性を図 4 に示す。同図は様々な拡散時間によって製作した試料の太陽電池特性であり、(a)は短絡電流 I_{sc} 、(b)は開放電圧 V_{oc} 、(c)は曲線因子 FF 、(d)は最大出力 P_{max}

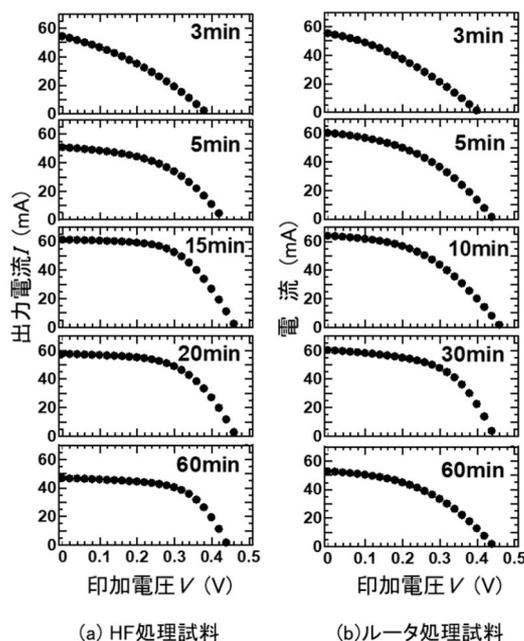


図 3 様々な拡散時間によって製作した太陽電池試料の $I-V$ 特性。(a)製作時の酸化膜除去に HF、(b)ルータを用いた場合。

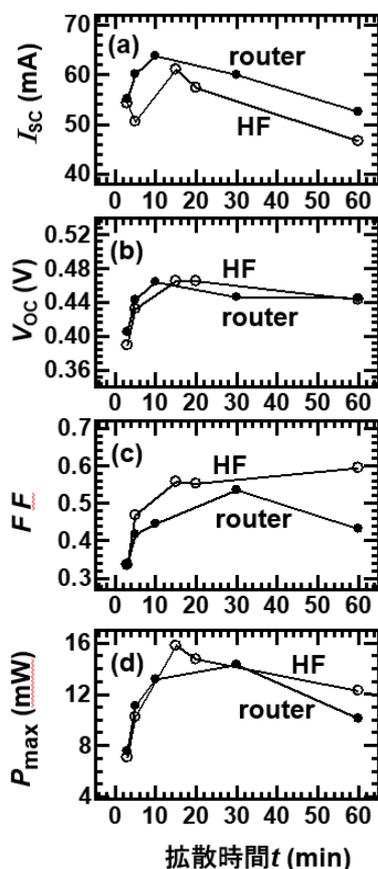


図 4 拡散時間を変化させて製作した試料の各太陽電池特性。HF および router は製作時の酸化膜除去に用いた方法。(a)短絡電流 I_{sc} 、(b)開放電圧 V_{oc} 、(c)曲線因子 FF 、(d)最大出力 P_{max}

(a)は短絡電流 I_{sc} 、(b)は開放電圧 V_{oc} 、(c)は曲線因子 FF 、(d)は最大出力 P_{max}

である。拡散時間をおよそ 15min 以下で製作した太陽電池試料では、拡散時間が短くなるにつれて各太陽電池特性は急激に低下している。HF 処理試料においてもルータ処理試料と同様の傾向を示していることから、拡散時間を短くして製作した太陽電池の特性低下はルータ処理による研削の影響ではないことが明らかとなった。また、拡散時間がおよそ 15min 以上では、各太陽電池特性は徐々に低下していく傾向にある。これは拡散時間が増加するにつれて p 型拡散層が厚くなり表面からの光照射による光が p 領域と n 領域の接合部である空乏層に到達し難くなるためである。ルータ処理試料において拡散時間を短くしたときの太陽電池特性の低下について知見を得るために太陽電池の pn 接合としての整流特性を調べた。図 5(a)に示すように拡散時間を 60min から 3min に減少させると逆方向の電流 I は増加していることがわかる(第 3 象限)。HF 処理試料においても同図(b)に示すようにルータ処理試料と同様な傾向が観測された。逆方向の電流 I の増加はリーク電流の増加を意味し、このリーク電流の増加は太陽電池特性を低下させる原因であることは一般に知られている。このことにより短い拡散時間によって製作したルータ処理試料における太陽電池特性の低下はリーク電流によるものであることが明らかとなった。

(4) 短時間拡散におけるリーク電流の増加

拡散時間を短くしたときのリーク電流の増加について調べるために、p 型拡散層表面の光学顕微鏡像を観察した。表面の SiO_2 が除去され p 型拡散層が露出された HF 処理試料(拡散時間 5min)の表面光学顕微鏡像を図 6 に示す。観測できるサイズの範囲内ではあるが拡散層の表面には直径数 μm の粒状の付着物が観測される。2.2 節で述べたように、不純物拡散溶液を塗布した後、溶剤は揮発し SiO_2 前駆体の膜に B_2O_3 が析出する。図 6 の点状の物質は、この析出した B_2O_3 が熱処理によって Si 基板表面に付着したものであると考えられる。また、図 8 のような表面形態は他の拡散時間においても観測され拡散時間による系統的な差は観測されなかった。

熱拡散による p 型拡散層の形成では、1100 の熱処理によって硼素 B が Si 基板の深さ方向と横方向へと拡散することによって層状の拡散層が形成される。図 6 に示したように粒状の B_2O_3 が Si 基板表面に点状に付着していることから、拡散時間 5min の薄い p 型拡散層では、その厚みと濃度が面内で不均一に形成されていると予想される。

Al 電極を形成する際、600 の温度によって焼結しており、Al と拡散層表面の Si とで合金を形成する²⁾。接合部付近まで合金を形成した場合、接合部が不完全となりリーク電流が生じる。このことから、拡散時間を短くすると拡散層が薄く合金によって不完全な接合部となる箇所が増えていくためリーク電流が増加すると考えられる。

(5) まとめ

半導体製造装置やフッ酸を用いない Si 太陽電池の製作工程において、熱拡散時間のそれぞれ異なる太陽電池を製作したときの太陽電池特性について調べた。拡散時間を短くすると太陽電池特性低下の要因となるリーク電流が増加することが整流特性における逆方向特性から明らかとなった。拡散時間を短くすると合金によって不完全な接合部となる箇所が増えるためリーク電流が増加すると考えられる。

大学等における実験実習は一般に 2 コマで実施される。限られた時間の中で余裕を持って太陽電池を製作するためには製作時間の短時間化が望まれる。拡散時間の短時間化は実験実習において余裕を持って製作するための重要な要素であり、拡散時間の短時間化によって太陽電池特性が低下することを把握しておくことは実験実習における特性評価の際の一助となる。

参考文献

- 1) 安森偉郎, 岡田工, 崔一煥: 応用物理教育, 42, 1, pp.21-25(2018).
- 2) 庄野克房: 超 LSI 時代の半導体技術 100 集 [], オーム社, 146

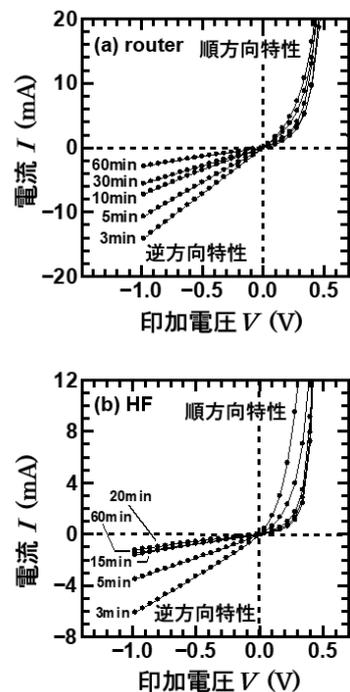


図 5 拡散時間を変化させて製作した太陽電池試料の整流特性。(b) ルータ処理試料, (a) HF 処理試料

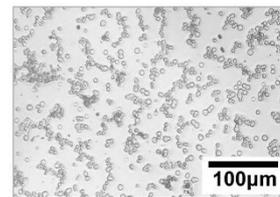


図 6 拡散時間 5min の HF 処理試料表面の光学顕微鏡像。酸化膜を除去した p 型拡散層の表面に粒状の物質が観測される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 安森偉郎, 岡田工, 崔一英	4. 巻 44
2. 論文標題 半導体製造装置やフッ酸を用いない シリコン太陽電池における製作時間の短縮化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用物理教育	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 安森偉郎, 岡田工, 崔一英	4. 巻 6
2. 論文標題 半導体製造装置やフッ酸を使わずに製作した実験実習用シリコン太陽電池の短時間拡散による特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東海大学 教育開発研究センター 紀要	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安森偉郎, 岡田工, 崔一英
2. 発表標題 半導体製造装置やフッ酸を用いないシリコン太陽電池製作の短時間化
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

半導体製造装置やフッ酸を用いないシリコン太陽電池における製作時間の短縮化
<https://drive.google.com/file/d/10c1v6U1xwRKBL10rspf3ffDW8EzwtwQ2Z/view?usp=sharing>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------