JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

| | |
|---|---|
| Title | 新規低温ドーピング法を利用したシリコン太陽電池の革新的製造技術の開発 |
| Author(s) | 大平，圭介 |
| Citation | 科学研究費助成事業研究成果報告書: 1-4 |
| Issue Date | 2019-06-12 |
| Type | Research Paper |
| Text version | publisher |
| URL | http://hdl.handle.net/10119/16025 |
| Rights | |
| Description | 挑戦的萌芽研究，研究期間：2016～2018，課題番号：16K14400，研究者番号：40396510，研究分野： 太陽電池 |

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

# 科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ６ 月 １２ 日現在

機関番号：１３３０２
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ１４４００

研究課題名（和文）新規低温ドーピング法を利用したシリコン太陽電池の革新的製造技術の開発

研究課題名（英文）Development of innovative fabrication technology for silicon solar cells using a novel low-temperature doping method

研究代表者
大平　圭介（Ohdaira, Keisuke）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：４０３９６５１０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ドーピング非晶質シリコン層を、ノンドープ非晶質シリコン層への事後のドーピングにより形成する「Catドーピング」を用いて作製し、シリコンヘテロ接合太陽電池を作製する技術の確立を目指したものである。非晶質シリコン/結晶シリコン界面でのキャリア再結合が悪化しないドーピング条件の明確化と、シリコンヘテロ接合太陽電池の動作確認および高開放電圧化を目標とした。その結果、主にドーピング時の基板温度の調整により、界面特性を悪化させることなくn型およびp型非晶質シリコン層を形成可能であることを見出した。また、Catドーピングで形成したp型非晶質シリコンを用いて作製した太陽電池の動作に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
結晶シリコン太陽電池における究極の構造の一つといえる、裏面電極型シリコンヘテロ接合太陽電池の量産化において、裏面の非晶質シリコンの安価なパターニングが課題となっている。本研究において、事後のドーピングで形成した非晶質シリコン膜が太陽電池に利用できることが見出されたことから、非晶質シリコン膜に対しCatドーピングをハードマスクを通して行うことにより、事後のパターニング法として展開できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to establish a technology to fabricate silicon heterojunction solar cells by using “Cat-doping” to form a doped amorphous silicon layer by post doping to an intrinsic amorphous silicon layer. We attempted to clarify doping conditions by which an amorphous silicon/crystalline silicon interface does not deteriorate and the operation of silicon heterojunction solar cells containing Cat-doped a-Si layers showing high open-circuit voltage. We have demonstrated that n-type and p-type amorphous silicon layers can be formed by Cat-doping without deteriorating interface qualities by tuning the substrate temperature during Cat-doping. We have also succeeded in the operation of silicon heterojunction solar cells with p-type amorphous silicon formed by Cat-doping.

研究分野：太陽電池

キーワード：シリコン　ドーピング　太陽電池　ヘテロ接合

## １．研究開始当初の背景

結晶シリコン太陽電池の高効率化に向け、良好な非晶質シリコン/結晶シリコン界面により高い開放電圧が実現できる、シリコンヘテロ接合太陽電池が注目されている。研究代表者らは過去に、加熱触媒体線での分解で生成したリン(P)およびホウ素(B)系のラジカル種によりシリコン表面に極薄ドーピング層を形成できる「Cat ドーピング法」を独自に開発している。また、このドーピング法の非晶質シリコンへの有効性も確認している。非晶質シリコンへの Cat ドーピングは、厚さ 10 nm 程度に自動的に制限されるため、例えば厚さ 20 nm 程度のノンドープ非晶質シリコン膜に P および B の Cat ドーピングを行うことで、既存のヘテロ接合太陽電池に類似のドープ非晶質シリコン/ノンドープ非晶質シリコン/結晶シリコン積層構造を容易に作製できると考えられる。そこで、非晶質シリコン膜への Cat ドーピング技術を、シリコンヘテロ接合太陽電池作製に活用できないか、と考えた。

## ２．研究の目的

本研究では、ドーピング非晶質シリコン層を、ノンドープ非晶質シリコン層への事後のドーピングにより形成する独自技術を用いて、シリコンヘテロ接合太陽電池を作製する基盤技術の確立に挑戦する。具体的な達成目標は、

(1) 非晶質シリコン/結晶シリコン界面でのキャリア再結合が悪化しないドーピング条件の明確化
(2) シリコンヘテロ接合太陽電池の動作確認と高開放電圧化

である。

## ３．研究の方法

### (1) 非晶質シリコン/結晶シリコン界面でのキャリア再結合が悪化しないドーピング条件の明確化

結晶シリコン両面に堆積したノンドープ非晶質シリコン単膜に対し、P または B の Cat ドーピングを行い、その前後において界面特性が悪化しない条件の明確化を試みた。Cat ドーピングの条件に応じ、表面再結合速度への影響が異なる可能性が考えられるため、触媒体温度、基板温度、ガス流量、処理圧力を系統的に変化させることで、表面再結合速度を悪化させることなく Cat ドーピングが行える条件の確立を目指した。図１に、ドーピング条件調査用の試料の構造を示す。20 nm 厚の非晶質シリコン膜の堆積には、触媒化学気相堆積(Cat-CVD)法を用いる。界面特性は、マイクロ波光導電減衰(μ-PCD)法により求められる少数キャリア寿命から定量化した。

図１ ドーピング条件調査用の試料の構造

### (2) シリコンヘテロ接合太陽電池の動作確認

Cat ドーピングにより形成した p 型および n 型非晶質シリコン膜を用いてシリコンヘテロ接合太陽電池を作製し、整流性、発電特性の確認を行った。特に、B の Cat ドーピングを行うことで p 型非晶質シリコンを作製した試料の太陽電池動作確認に注力した。図２に、作製したシリコンヘテロ接合太陽電池の構造を示す。また、Cat ドーピング条件や太陽電池作製後のポストアニール条件の最適化による開放電圧の改善も試みた。

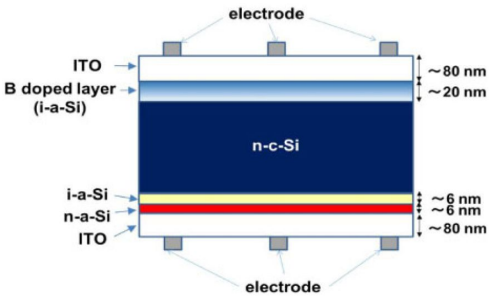


図 2 作製したシリコンヘテロ接合太陽電池の構造

## ４．研究成果

図３に、非晶質シリコン膜に基板温度 350 ℃で追加アニールおよび P の Cat ドーピングを行った試料の各処理前後の実効少数キャリア寿命を示す。追加アニールを行ったのは、Cat ドープ時にかかる加熱処理の影響を分離して評価するためである。Cat ドープを行った試料において、少数キャリア寿命の低下は見られず、むしろ向上する傾向が確認された。Cat ドープ後の非晶質シリコン膜の導電率の向上も確認されており、パッシベーションを損なうことなく、P の Cat ドーピングが可能であることが確認できた。

図４に、基板温度 350 ℃で追加アニール、原子状水素処理、および B の Cat ドーピングを施した試料の各処理前後の少数キャリア寿命を示す。B の Cat ドーピングの場合、原料ガスである $B_2H_6$ の分解に、原子状水素との気相反応が必要であるため、原子状水素処理のみを行った試

料も比較として用意した。B の Cat ドーピングにおいても、パッシベーション性能を悪化させることなく、p 型非晶質シリコンの形成が可能であることを確認した。なお、P ドーピング、B ドーピングの場合とも、低い基板温度で Cat ドーピングを行った際には、原子状水素によるエッチングにより、ドーピングが十分行えず、少数キャリア寿命も低下することも確認した。

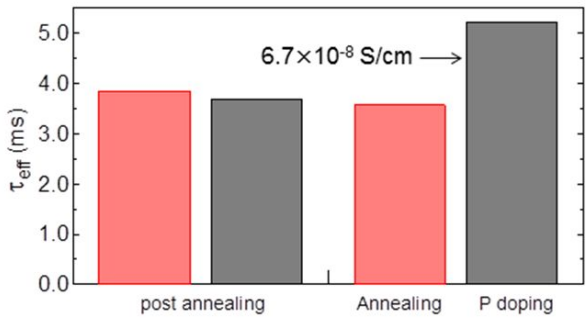


図 3 非晶質シリコン膜に基板温度 350 ℃で追加アニールおよび P の Cat ドーピングを行った試料の各処理前後の実効少数キャリア寿命

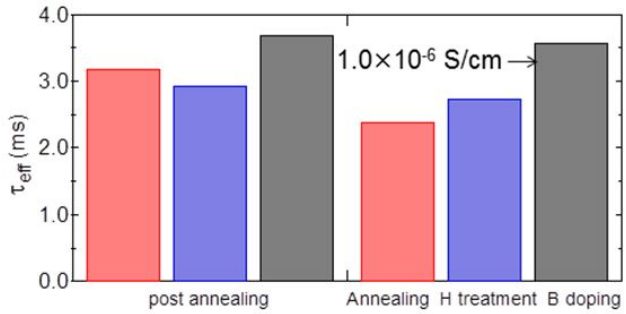


図 4 非晶質シリコンに基板温度 350 ℃で追加アニール、原子状水素処理、および B の Cat ドーピングを行った試料の各処理前後の少数キャリア寿命

図 5 に、Cat ドーピングにより p 型非晶質シリコン層を形成したシリコンヘテロ接合太陽電池の、疑似太陽光照射下での電流密度-電圧特性を示す。太陽電池動作と、600 mV を超える開放電圧が確認できる。ポストアニール条件の最適化後、短絡電流密度 32.7 mA/cm$^2$、開放電圧 617 mV、曲線因子 0.625、変換効率 12.6%の特性が得られた。この結果から、Cat ドーピングで形成した p 型非晶質シリコン膜のシリコンヘテロ接合太陽電池への利用可能性が実証された。今後、裏面電極型シリコンヘテロ接合太陽電池への展開が期待される。

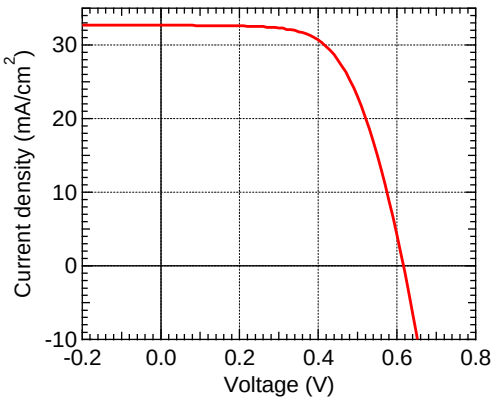


図 5 Cat ドーピングにより p 型非晶質シリコン層を形成したシリコンヘテロ接合太陽電池の疑似太陽光照射下での電流密度-電圧特性

## ５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）


1. K. Ohdaira, J. Seto, and H. Matsumura "Catalytic phosphorus and boron doping to amorphous silicon films" Jpn. J. Appl. Phys. 56, 08MB06-1-5 (2017) 査読有
2. 大平 圭介、Trinh Cham Thi、及川貴史、瀬戸純一、小山晃一、松村英樹 "触媒化学気相堆積（Cat-CVD）法による太陽電池用高品質パッシベーション膜の形成" 表面科学 38, pp. 234-239（2017）査読有


〔学会発表〕（計 13 件）


1. 秋山 勝哉、大平 圭介 "B Cat ドーピングを用いた Si ヘテロ接合太陽電池の作製" 日本学術振興会第 175 委員会 第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、2018 年 7 月
2. K. Akiyama and K. Ohdaira "Silicon Heterojunction Solar Cell with a p-type Amorphous Silicon Emitter Formed by Catalytic Impurity Doping" World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7). 2018 年 6 月

3. 秋山 勝哉、大平 圭介 "B Cat-doped a-Si:H 層をもつ Si ヘテロ接合太陽電池" 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018 年 3 月
4. K. Ohdaira, Trinh Cham Thi, S. Tsuzaki, T. Oikawa, J. Seto, K. Koyama, and H. Matsumura "Application of catalytic chemical vapor deposition to the fabrication process of high-efficiency crystalline silicon solar cells" 13th China SoG Silicon and PV Power Conference, 2017 年 11 月
5. K. Akiyama and K. Ohdaira "Change in the electrical characteristics of a-Si films and a-Si:H/ITO interfaces by boron Cat-doping" 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 2017 年 11 月
6. 秋山 勝哉、大平 圭介 "B Cat-doping による a-Si 膜および a-Si／ITO 界面の電気特性の変化" 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、2017 年 9 月
7. 秋山 勝哉、大平 圭介 "B Cat-doping 法による a-Si／ITO 界面の電気特性の変化" 日本学術振興会第 175 委員会 第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、2017 年 7 月
8. 秋山 勝哉、大平 圭介 "B Cat-doping による a-Si 膜および a-Si／ITO 界面の電気特性の変化" 第 14 回 Cat-CVD 研究会、2017 年 7 月
9. 秋山 勝哉、大平 圭介 "B Cat-doping 法による a-Si/ITO 界面の電気特性の変化" 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月
10. K. Ohdaira, Trinh Thi Cham, T. Oikawa, J. Seto, K. Koyama, and H. Matsumura "Application of Cat-CVD technology to crystalline silicon solar cells" 化学工学会第 82 年会、2017 年 3 月
11. K. Ohdaira, J. Seto, and H. Matsumura "Catalytic phosphorus and boron doping to amorphous silicon films" 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), 2016 年 10 月
12. K. Ohdaira, Trinh Thi Cham, K. Koyama, J. Seto, and H. Matsumura "Cat-CVD silicon nitride films and catalytic impurity doping for application to silicon-based solar cells" 9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition, 2016 年 9 月
13. 大平　圭介、瀬戸　純一、松村　英樹 "a-Si への Cat ドーピングのパッシベーション能力への影響"第 13 回 Cat-CVD 研究会、2016 年 7 月

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。