

酸化ホウ素膜を堆積させた製作実習用 手作りシリコン太陽電池の性能

安森偉郎^{*1}, 岡田工^{*2}

Performance of handmade silicon solar cell
for student fabrication practice with boron oxide film

by

Yoshio Yasumori*, Takumi Okada**

*Tokai University Center for Educational Research and Development

** STEM Education Center, Tokai University

概 要

半導体製造装置やフッ酸を使用しない手作りシリコン (Si) 太陽電池の製作実習教材の開発において, Si 基板に直接 B₂O₃ 層を堆積させて太陽電池を製作した。電気的特性の測定結果から, 短絡電流, 開放電圧, 最大出力電力などの太陽電池の基本性能がこれまでの手作り太陽電池よりも向上することが明らかとなった。走査電子顕微鏡(SEM)による形態観察とエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による元素分析から, B₂O₃ 層を堆積させた手作り太陽電池の基本性能が向上した要因について考察した。

*1 東海大学教育開発研究センター

*2 東海大学理系教育センター

1. はじめに

近年、地球温暖化による気象災害などが懸念され（伊藤，2003），温暖化にともなう気温の上昇の主な原因は，化石燃料の使用によって温室効果ガスである二酸化炭素（ CO_2 ）濃度の増加と考えられている（田中，1991）。 CO_2 排出削減の重要性から，エネルギー問題への関心が高まり再生可能エネルギー（絶えず補充される自然エネルギー）の一つとして太陽電池は注目されている（小川，2006）。2015年の国連サミットにおいて持続可能な開発目標（SDGs）が採択され（環境省，2020），クリーンエネルギーもその目標の一つであることから，太陽電池などを用いたエネルギー環境教育に関する研究はSDGsへの取組みの一端を担うことに繋がる。

太陽光パネルを備えた発電システムによる交流電力の実験実習は，教育機関において実施されてきている（土屋，1982；若林，2019；山本，2000）。このような太陽光発電システムによる実習教材では，直流の光起電力を交流に変換し，交流 100V の電気機器を稼働させることができるため，発電の仕組みへの理解を深める契機となり，太陽光発電分野やエネルギー環境問題にさらに興味を抱かせるきっかけとなると期待される。すなわち，太陽光発電システムの実習教材では，太陽光からの光エネルギーを太陽電池によって直流電圧に変換させ，さらに直流から交流への変換器によって 100V の交流を発生させることを学習することができる。このプロセスは太陽光発電の基本であることから，このような実習教材を用いた取り組みは，発電の仕組みへの理解を深める契機となる。

太陽光パネルを用いた発電装置は，比較的パネルが大きく高価で大掛かりとなるため，市販の学習教材用の太陽電池（以後，太陽電池と称する）を用いて交流を出力させることができれば，低出力ではあるが安価で手軽な発電教材となる。そこで，白熱電球によって太陽電池に光照射を行い，直流から交流への変換に低出力用 DC/AC インバータを用いて交流 100 V の電圧を出力させ，1 W の常夜灯電球（ナツメ球）を点灯させる教材を開発した（安森，2023）。

また，筆者らは必要最低限の半導体製造装置を用いてシリコン（Si）太陽電池の製作実習教材を開発する研究を行ってきた（崔，2000）。しかしながら，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現状がある。そこで，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半導体デバイス製作実習を実施する方法について研究してきた。その結果，半導体製造装置やフッ酸などを使わない手作り Si 太陽電池の製作実習教材を開発した（安森，2018，2020）。

このようにして製作した手作り太陽電池を用いて交流 100 V を出力させることができれば，太陽電池の製作から発電までの太陽光発電の一連の基礎を学べる実習教材となる。しかしながら，現状では太陽電池の性能が低く，100 V を出力させる発電は難しい。そこで，製作方法を検討し太陽電池の性能を向上させる研究を行ってきている。

手作り太陽電池の製作において p 型拡散層を形成する際の不純物源として粉末の酸化ホウ素（ B_2O_3 ）を用いている。本研究において開発している製作実習教材は学生向けであることから，

粉末の B_2O_3 の飛散防止を講じる必要がある。そこで、 B_2O_3 を酸化ケイ素 (SiO_2) コート剤に溶解させて p 型拡散層を形成してきた (安森, 2018)。このような、 SiO_2 コート剤に B_2O_3 を溶解させて Si 基板に塗布する方法では、ホウ素 (B) 元素が SiO_2 膜中に閉じ込められ、十分な不純物濃度の p 型拡散層¹が Si 基板に形成されないと考えられる。本研究では、粉末の B_2O_3 を Si 基板に堆積させ、この B_2O_3 の飛散防止対策として B_2O_3 を添加した SiO_2 コート剤を上から塗布することで p 型拡散層を形成した。このような方法により製作した太陽電池の電気的特性を計測した結果、太陽電池の性能が向上することがわかった。

本論文では、 B_2O_3 層を堆積させた場合と堆積させない場合の太陽電池をそれぞれ製作し、走査電子顕微鏡(SEM)による形態観察と付属のエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による元素分析から、 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の性能が向上した要因について考察した結果について述べる。ここで、上述した B_2O_3 層とは本論文の題目における酸化ホウ素膜のことである。

2. B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の製作方法

2.1 p 型拡散層の形成

B_2O_3 層を有する太陽電池の製作では、面方位 (100)、比抵抗 $5\ \Omega\text{cm}$ の 4 インチ n 型 Si ウエハを 1/4 に劈開したものを基板として用いた。劈開した Si 基板の周囲にマスキングテープを貼付し、p 型拡散層を形成する領域を 12 cm^2 とした。メチルアルコール (CH_3OH) に粉末の B_2O_3 を 160 mg/mL の濃度で溶解させ、刷毛を用いて Si 基板に $130\ \mu\text{L}$ 塗布することによって B_2O_3 薄膜を堆積させた。

次に、堆積させた B_2O_3 の飛散防止策として、 SiO_2 コート剤 (Si-05S, 高純度化学研究所) に B_2O_3 を 70 mg/mL の濃度で添加させた溶液を滴下によって塗布した。また、 SiO_2 コート剤に B_2O_3 を添加させている理由は滴下による B_2O_3 層の損壊を防ぐためである。

図 1(a) にマスキングテープを剥離した後の断面模式図を示す。塗布後にホットプレート (HP-1SA, アズワン) により $100\text{ }^\circ\text{C}$ で 5 min 間乾燥させ、マッフル炉 (FP21, ヤマト科学) を用い、大気中 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ で 12 min 間の熱拡散を行った。図 1(b) の模式図に示すように熱拡散により B_2O_3 薄膜から B 元素が n 型 Si 基板に拡散し p 型拡散層が形成される。

2.2 絶縁膜の除去

p 型拡散層を形成する際に熱拡散を大気中で行っているため、裏面には絶縁膜 (SiO_2 膜) が成膜される。そこで、裏面の四辺にマスキングテープを貼付し、布ヤスリ (#400 番) を用いて絶縁膜を除去した。次に、ルータ (HR-DX, Bigman) の先端にフェルトバフのビットを取り付け、#8000 番の研磨剤を用いて表面の絶縁膜に電極用のコンタクトホールを形成した。ルータとは電動工具のことであり、一般にガラスの彫刻等の様々な用途で使用する。コンタクトホー

¹ 十分な不純物濃度の p 型拡散層とは、所望の電気的特性が得られる程度にホウ素が拡散・投入された層のことである。

ルの形成では一箇所当たりの形成時間を約 5 s から 20 s とし、下地の Si 基板から銀色の光の反射を確認できたら完了とした。このような手順によって絶縁膜を除去した後の模式図を図 1(c) に示す。

2.3 電極形成

電極にはアルミニウム（以下 AL と略す）ペースト（アルソーラ，東洋アルミ）を用いた。図 1(d) に示すように、コンタクトホールに AL ペーストを点状に塗布し、100 °C で 5 min 間乾燥させた。

次に、AL ペーストを裏面に塗布し表面と同条件で乾燥させ、大気中において 600 °C で 10 min

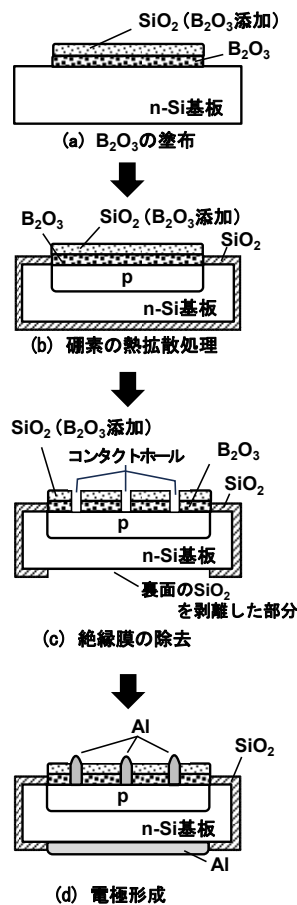


図 1 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の製作工程

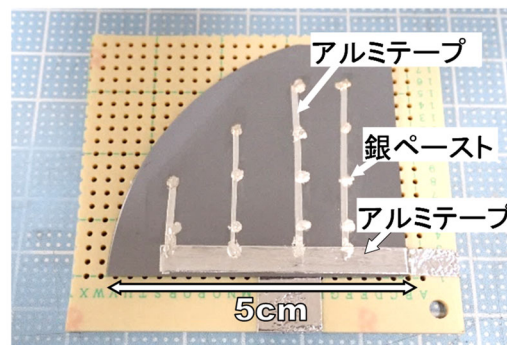


図 2 アルミテープと銀ペーストを用いて楕型電極を形成した太陽電池。

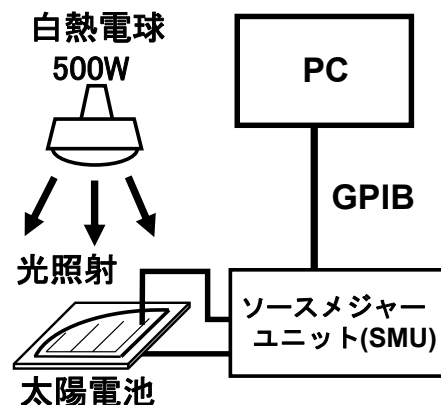


図 3 太陽電池計測システムの概略図

間の焼結処理を行った。その後、図 2 に示すように細長く切り取った AL 粘着テープを点状の AL 電極の傍に貼付し銀ペースト（D550，藤倉化成）を用いて両者を接続した。このとき銀ペーストは大気中 100 °C で 10 min 間乾燥させた。

3. 太陽電池特性の計測

製作した太陽電池の上方に 500 W の白熱電球を設置し、ソーラーパワーメータ（TM-750 TENMARS）を用いて、 1.0 kW/m^2 の放射照度となるように高さを調整した。その後、図 3 に示

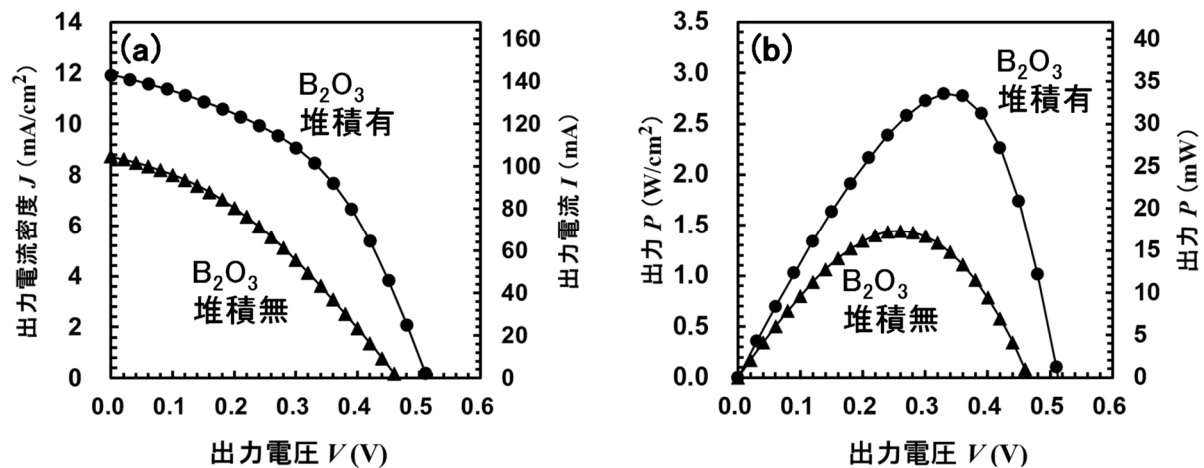


図4 B_2O_3 層の堆積の有無による太陽電池特性
(a) 電流密度-電圧特性 (J - V 特性) (b) 電力-電圧特性 (P - V 特性)

そのような太陽電池計測システムを用いて電気的特性を調べた。太陽電池計測システムでは、ソースメジャーユニット (SMU: B2901A, Keysight) と PC が GPIB で接続され、太陽電池 I - V 測定

表1 B_2O_3 層の堆積の有無による太陽電池の性能 (受光面積: 12cm²)

性能評価項目	B_2O_3 有	B_2O_3 無
短絡電流 I_{sc} (mA)	143	105
短絡電流密度 J_{sc} (mA/cm ²)	12	9
開放電圧 V_{oc} (V)	0.51	0.47
最大出力電力 P_{max} (mW)	34	17
最大出力動作電圧 V_{max} (V)	0.34	0.26
最大出力動作電流 I_{max} (mA)	100	67
曲線因子 FF	0.46	0.36
変換効率 η (%)	2.8	1.6

ソフト (システムハウスサンライズ) によって自動計測される。SMU とは電圧を印加させるだけでなく、電圧電流特性を計測させることができる機器のことである。

B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の電流密度-電圧特性 (J - V 特性) を図 4(a)に、電力-電圧特性 (P - V 特性) を図 4(b)に示す。また、比較のため B_2O_3 層を堆積させていない太陽電池の特性もそれぞれ示した。 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の製法については第2章で述べたが、その製法において堆積させる工程を除いたものが B_2O_3 層を堆積させていない製法となる (2020, 安森)。図 4(a)の結果から、出力電流密度は B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の方が高く、同図(b)の出力においても同様に高いことがわかる。これらの図から得られた太陽電池の性能評価結果を表1に示す。 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池では、短絡電流は 143mA、開放電圧は 0.51V に増加するなどすべての項目において B_2O_3 層を堆積させていない太陽電池よりも性能が向上していることがわかった。

4. B₂O₃層を堆積させていない太陽電池の表面分析

はじめに B₂O₃ 層を堆積させずに製作した太陽電池について、走査型電子顕微鏡 (SEM) による形態観察、およびエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による元素分析を行った。

4.1 走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面形態

B₂O₃ 層を堆積させていない太陽電池の製作では、p 型拡散層を形成する際に B₂O₃ を添加した SiO₂ 溶液を Si 基板に塗布し熱拡散させている。この場合の熱拡散後における光学顕微鏡像を図 5(a)に示す。表面の SiO₂ 薄膜には 100 μm 前後の凝集物が観測される。SiO₂ 溶液のみを塗布した場合、このような凝集は観測されないことから、凝集物は B₂O₃ によるものであると考えられる。図 5(b)に示した SEM 画像では、凝集物以外はチャージアップにより黒く写ることから、絶縁体の SiO₂ 薄膜であると考えられる。チャージアップとは電子線を照射したときの帯電のことであり、帯電によって二次電子の放出が抑えられ SEM 画像では黒く写る。

4.2 エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による元素分析

凝集物が B₂O₃ であるかを同定するために EDS による元素分析を行った。試料表面に電子線を入射させると二次電子以外に原子固有の X 線 (特性 X 線) が放出される。EDS ではこの特性 X 線のピーク値のエネルギーから元素を判定することができる。例えば、ホウ素 (B) 元素では 0.183 keV、炭素 (C) 元素では 0.277 keV、酸素 (O) 元素では 0.525 keV、Si 元素では 1.739 keV にピークを持つ線スペクトルとなり、軽元素ほど特性 X 線のエネルギーは低くなる。

図 5(b)の SEM の画像領域全体から放出された X 線、および元素分析の結果を図 6 に示す。EDS スペクトルから B, C, O, Si 元素からの K α 線 (特性 X 線) が観測される。K α 線とは電子線を照射した際に内核の電子を励起、すなわち原子を励起させ L 殻から K 殻に電子が遷移するとき生じる X 線のことである。

特性 X 線のピーク強度から得られた簡易定量分析の結果を図 6 の挿入図に示す。元素の割合は O > Si > B > C の順であった。また、C 元素の検出は、大気中での熱処理によって C 元素が試料へ混入しただけでなく、真空チェンバー内への拡散オイルのミストによる汚染、試料固定用テープや真空チェンバーの材質から放出されるガスなどに由来すると考えられる。

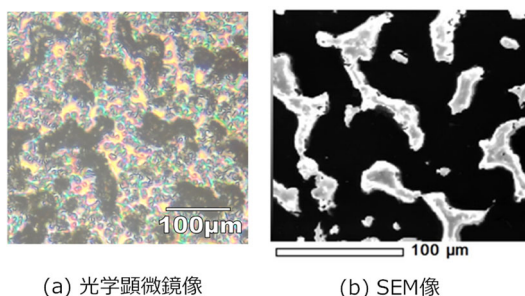


図 5 B₂O₃ 添加 SiO₂ 溶液を Si 基板表面に塗布し熱拡散させて製作した太陽電池の表面形態。B₂O₃ 層は Si 基板に堆積させていない。

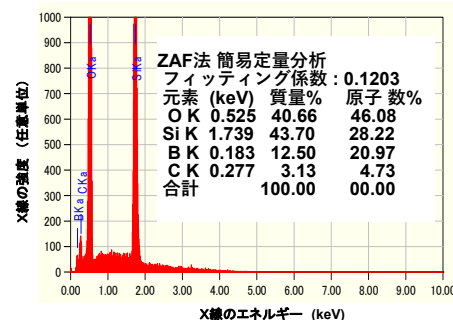


図 6 B₂O₃ 添加 SiO₂ 溶液のみを Si 基板表面に塗布して製作した太陽電池表面の SiO₂ 薄膜 (B₂O₃ 添加) からの EDS スペクトル。

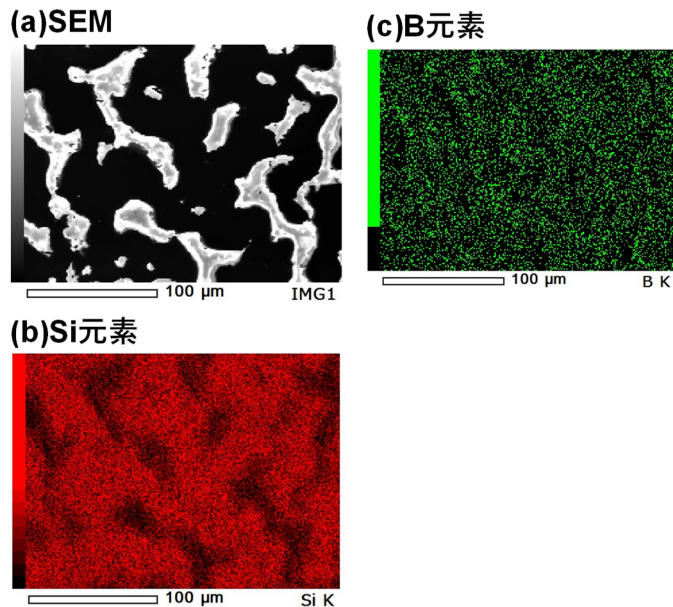


図7 B_2O_3 添加 SiO_2 溶液のみを Si 基板表面に塗布して製作した太陽電池表面における EDS による元素マッピング画像。
(a) SEM 像, (b) Si 元素, (c) B 元素

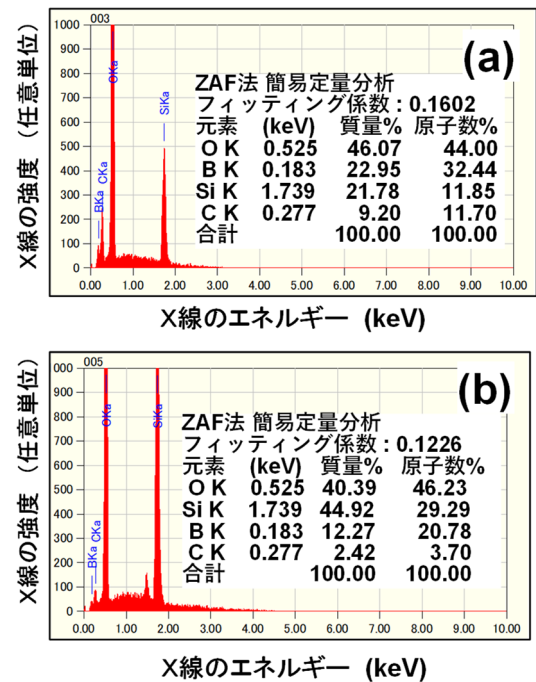


図8 B_2O_3 添加 SiO_2 溶液のみを Si 基板表面に塗布して製作した太陽電池表面の EDS スペクトル。
(a) 凝集物 (b) SiO_2

4.3 凝集物の元素分析

図5において観測された凝集物を同定するために元素のマッピング分析および点分析を行った。元素マッピング分析とは特性 X 線による元素の分布を二次元的に可視化した分析法である。図7(a)にマッピングに用いた SEM 画像を示す。(b)には Si 元素からの特性 X 線の強度分布を赤色で示している。赤の明暗は特性 X 線の信号強度であり、暗い部分は信号強度が弱いことを示している。この暗い部分の位置と SEM 画像の凝集物の位置がほぼ一致する。このことから、凝集物では Si 元素からの特性 X 線の強度が弱く、Si 元素の濃度が低いことを示している。B 元素からの特性 X 線については図7(c)に示すように、緑色で示した。B 元素からの特性 X 線では SEM 画像と相関するような斑紋は観測されないことがわかる。

さらに、凝集物の点分析を行った。点分析では数 μ m 径のスポット状の電子線を凝集物に照射して特性 X 線を検出する。図8(a)に凝集物からの EDS スペクトルを示す。挿入図の簡易定量分析の結果から元素の割合は $O > B > Si > C$ の順である。 SiO_2 薄膜形成の際に微量の B_2O_3 を添加しただけにもかかわらず、Si 元素よりも B 元素の割合が大きいことから、凝集物は主に B_2O_3 であることを示している。C 元素からの信号の検出については上述したように大気中での熱拡散によるものと考えられる。

図7(a)の SEM 画像においてチャージアップにより黒く写る箇所の点分析を行った際の X 線スペクトルを図8(b)に示す。簡易定量分析より元素の割合は $O > Si > B$ の順であることから、図7(a)の SEM 画像において黒く観測される箇所は、少なくとも B 元素を含む SiO_2 であることを示している。

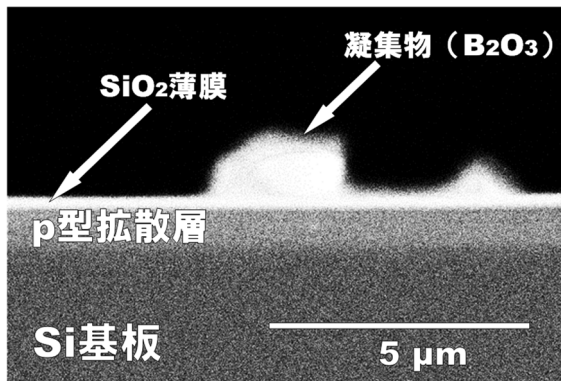


図 9 B₂O₃ 層を堆積させていない太陽電池の断面 SEM 画像。SiO₂ 薄膜 : 0.35μm, p 型拡散層 : 0.88μm

図 9 に B₂O₃ 添加 SiO₂ 溶液のみを Si 基板表面に塗布して製作した太陽電池の断面 SEM 画像を示す。表面に観測される 0.35μm の白色に観測される層は B 元素を含む SiO₂ 薄膜であり、エッジ効果によって白色像となる。また、薄膜上には B₂O₃ の凝集物が観測され、Si 基板には 0.88μm の p 型拡散層が観測される。

これらの結果から、B₂O₃ 層を堆積させずに B₂O₃ 添加 SiO₂ 溶液のみを Si 基板表面に塗布して製作した太陽電池の表面には、SiO₂ に添加させた B₂O₃ が無数に凝集し、凝集物付近では p 型拡散層における不純物濃度が高く、それ以外では低下するといった不均一性が生じ、それが太陽電池の性能を低下させることの一因になっているとも考えられる。

5. B₂O₃ 層を堆積させた太陽電池の表面分析

5.1 B₂O₃ 薄膜の表面形態と元素分析

製作した B₂O₃ 層を有する太陽電池は、Si 基板上に B₂O₃ 薄膜が堆積され、その上に B₂O₃ を添加した SiO₂ 薄膜が堆積されている 2 層構造である。最表面の B₂O₃ 添加 SiO₂ 薄膜の表面分析を行うと、下層の B₂O₃ の形態や構成元素の情報が含まれるため、表面からの分析を難しくする。そこで、はじめに Si 基板に B₂O₃ 薄膜だけを堆積させた状態の表面形態や構成元素について調べた。

CH₃OH 溶液に B₂O₃ を 160mg/mL の濃度で溶解させた溶液を調製し、そこから 130 μL の量を Si 基板（比抵抗 5 Ω・cm の 4 インチ n 型 Si ウエハを 1/4 に劈開）に塗布し、1100℃で 12min 間の熱処理によって B₂O₃ 薄膜を堆積させた。堆積させた B₂O₃ 薄膜の光学顕微鏡像を図 10 に示す。粉末状の B₂O₃ は熱処理によって平坦な干渉色を呈する膜となっている。B₂O₃ の融点は 450℃、沸点は 1860℃であることから、1100℃の熱処理による融解により平坦な薄膜になる。

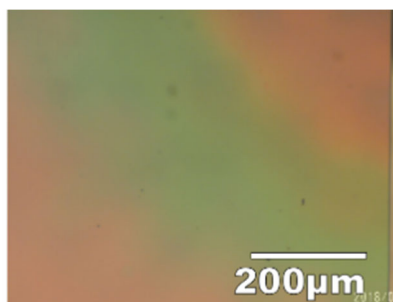
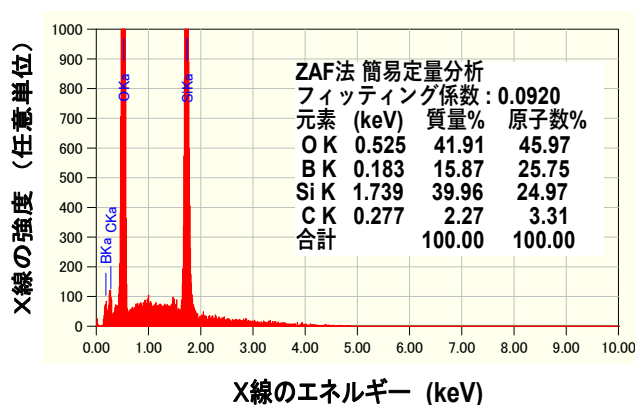
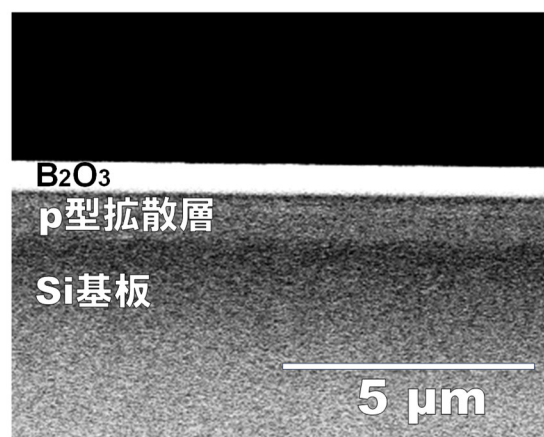
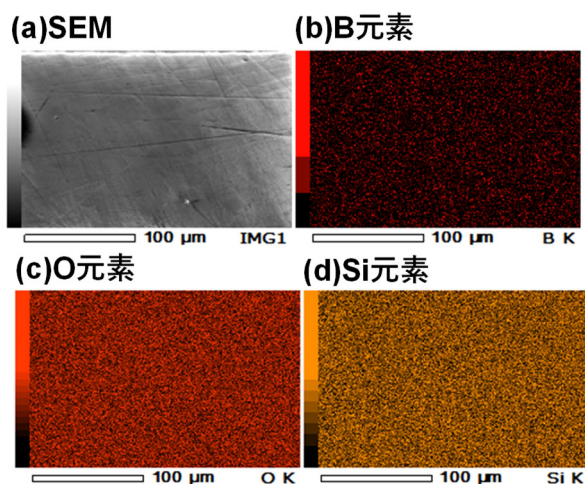
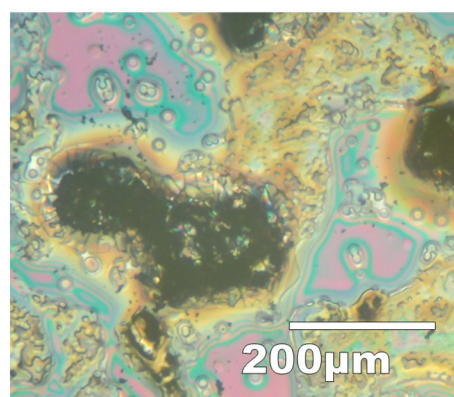


図 10 Si 基板に B₂O₃ 薄膜を形成させたときの光学顕微鏡像。粉末状の B₂O₃ は熱処理によって平坦な薄膜になっている。

図 11 Si 基板に B_2O_3 を堆積させた薄膜からの EDS スペクトル図 13 Si 基板に B_2O_3 を堆積させた薄膜の断面 SEM 画像図 12 Si 基板に堆積させた B_2O_3 薄膜の EDS による元素マッピング画像。(a) SEM 画像 (b) B 元素 (c) O 元素 (d) Si 元素図 14 B_2O_3 を堆積させて製作した太陽電池表面からの光学顕微鏡像。

B_2O_3 薄膜における元素分析の結果を図 11 に示す。EDS スペクトルに O, B, Si 元素からのピークが観測される。簡易定量分析よりこれらの元素の割合は $O > B > Si > C$ の順であることから、Si 基板に B_2O_3 薄膜が堆積していることを示している。Si 元素からの信号は下地の基板からのものであり、C 元素からの信号は大気中での熱処理によるものと考えられる。

B_2O_3 薄膜の面内分布について調べるために元素のマッピング分析を行った。図 12(a)に分析に用いた SEM 画像、(b)に B 元素、(c)に O 元素、(d)に Si 元素のマッピング画像を示す。この図から B, O, Si の 3 元素は一樣に分布していることがわかった。図 13 に示した断面 SEM 画像から、 B_2O_3 薄膜の膜厚は $0.8 \mu m$ であり、均一な厚みを有することが確認された。

5.2 表面形態と元素分析

B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の製作では、2 章で述べたように Si 基板に B_2O_3 を塗布した後、上から B_2O_3 添加 SiO_2 溶液を塗布し、熱処理を実施することで p 型拡散層を形成している。この熱処理後の光学顕微鏡像を図 14 に示す。表面には $200 \sim 400 \mu m$ 程度の径の凝集物が観測される。図 15(a)の表面 SEM 画像に示すように凝集物は黒く写りチャージアップしていることから、凝集物は主に SiO_2 と考えられる。

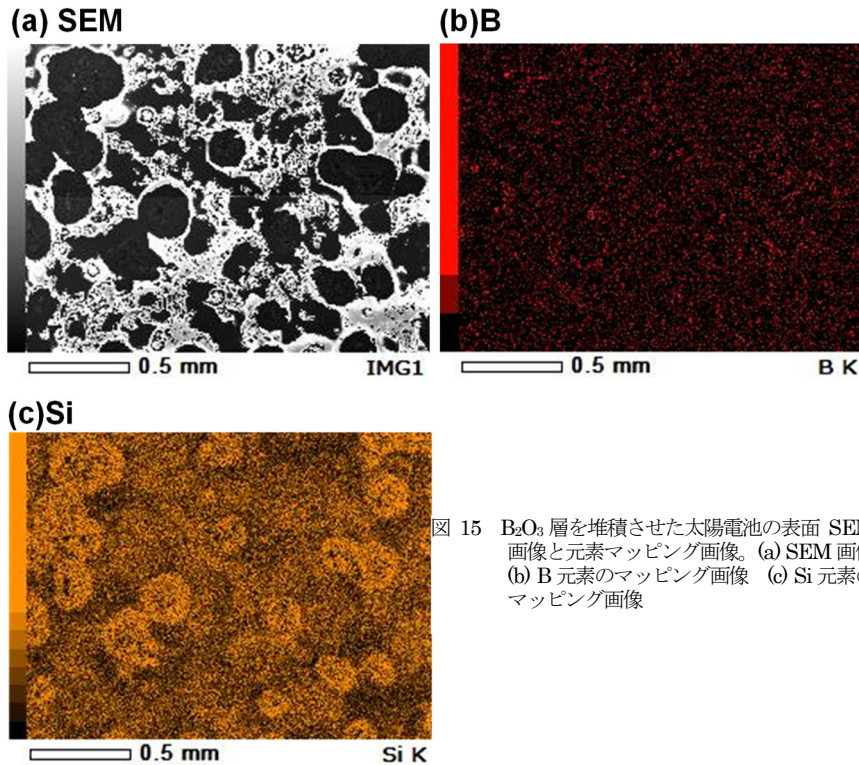


図 15 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の表面 SEM 画像と元素マッピング画像。(a) SEM 画像 (b) B 元素のマッピング画像 (c) Si 元素のマッピング画像

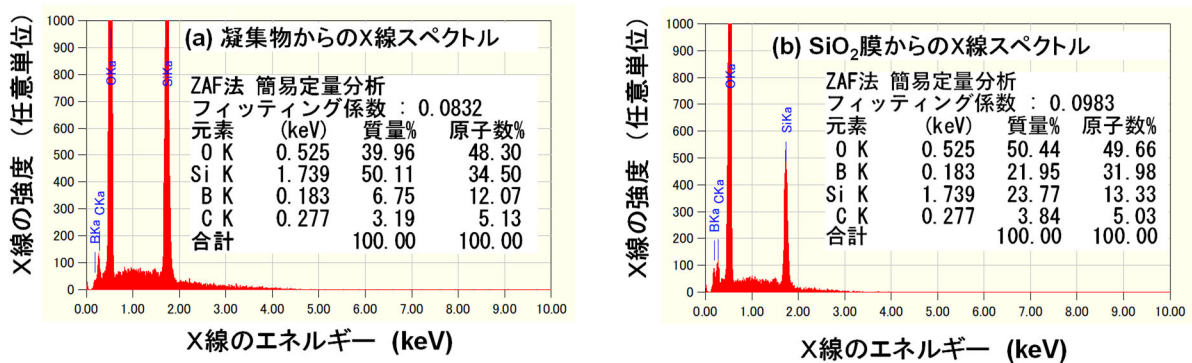


図 16 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池表面の凝集物と B_2O_3 添加 SiO_2 膜からの EDS スペクトル。(a) 凝集物 (b) SiO_2 膜 (B_2O_3 添加)

この凝集物の構成元素について調べるために、B 元素と Si 元素について EDS のマッピング分析を行った。図 15(b)に示すように B 元素では特性 X 線の強度が弱いため全体が暗くなっているが、比較的一様な強度分布を示している。一方、図 15(c)に示す Si 元素からの特性 X 線では、強度の強い箇所が円状に観測され凝集物の位置と一致する。そこで凝集物の点分析を行い、その結果を図 16(a)に示す。挿入図の簡易定量分析の数値から、原子数の割合は $O > Si > B$ の順であり、このことは、凝集物が B 元素を含んだ SiO_2 によって構成されていることを示している。一方、凝集物以外における原子数の割合は、図 16(b)に示すように $O > B > Si$ の順となり、Si 元素よりも B 元素の割合が多い。また、図 15(c)に示すように Si からの特性 X 線の信号が表面全体から観測される。これらのことから、凝集物以外における表面の SiO_2 膜は非常に薄く、下地の B_2O_3 膜からの特性 X 線の影響によって $O > B > Si$ の順となっていると推測される。

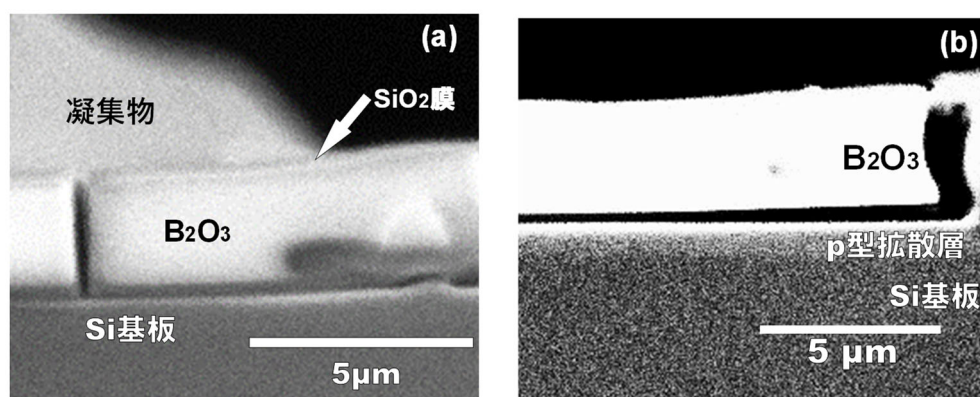


図 17 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の断面 SEM 画像。
(a) 断面 SEM 画像 (b) コントラスト強調画像

B_2O_3 層を堆積させた太陽電池の断面 SEM 画像を観察した。図 17(a)に示すように、Si 基板に厚さ $2.4\mu m$ の B_2O_3 薄膜、その上に $0.3\mu m$ の薄膜が確認され、この薄膜は SiO_2 と考えられる。観測される B_2O_3 薄膜のクラックや Si 基板からの剥離は、マッフル炉から試料を取り出した際に急激に冷やされるときに生じたものと推測される。また、(b)のコントラスト強調画像から $0.8\mu m$ の p 型拡散層が観測される。

5.3 太陽電池の性能

B_2O_3 層を堆積させていない太陽電池の製作では、4.1 節で述べたように、 SiO_2 に添加させた B_2O_3 からの B 元素を熱拡散させ p 型拡散層を形成している。この方法では熱拡散の際に SiO_2 膜中に B 元素が閉じ込められ、充分な不純物濃度の p 型拡散層が Si 基板に形成されないと考えられる。また、熱処理によって B_2O_3 の凝集物が数多く形成されることから、凝集物付近では p 型拡散層における不純物濃度は高く、それ以外では不純物濃度が低下するという面内における不均一性が生じると考えられる。これらのことが太陽電池の性能を低下させる一因になっていると推測される。

一方、 B_2O_3 層を堆積させた太陽電池では、 B_2O_3 薄膜を Si 基板に直接堆積させている。これにより B 元素を比較的高濃度で面内に均一に熱拡散させることができるため、太陽電池の基本性能が向上したと考えられる。

6. まとめ

半導体製造装置やフッ酸を使わない手作り太陽電池の製作において、これまで B_2O_3 添加 SiO_2 溶液を Si 基板に塗布する方法により太陽電池を製作してきた。本研究では太陽電池の性能を向上させるために B_2O_3 を直接 Si 基板に塗布する方法によって製作した。その結果、短絡電流密度、開放電圧、最大出力電力などの基本性能が上向くことが明らかとなった。SEM による表面形態および EDS による元素分析結果から、比較的均一な p 型拡散層が形成されたことにより基本性能が向上したと考えられる。

参考文献

- 伊藤 和明 (2003). 地球温暖化が招く災害多発時代 災害情報, 1, 12 -13.
- 田中 正之 (1991). CO₂ と地球温暖化 環境技術, 20, 10, 652 - 656.
- 小川 紀一郎 (2006). 再生可能エネルギーの意義と展望 日本機械学会論文集 B 編, 72(722), 2332 - 2337.
- 環境省 (2020). SDGs の基礎 事業構想大学院大出版部, 2 - 24.
- 崔 一煥・岡田 工・佐藤 洋一・安森 偉郎 (2000). 手作り太陽電池の性能評価 応用物理教育, 24, 2, 99 - 102.
- 安森 偉郎・岡田 工・崔 一煥 (2018). 半導体製造装置やフッ酸を用いないシリコン太陽電池の製作 応用物理教育, 42, 1, 21 - 25.
- 安森 偉郎・岡田 工・崔 一煥 (2020). 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 応用物理教育, 44, 1, 19 - 24.
- 土屋 幸男・佐川 吉男・吉田 学 (1982). 太陽光発電教育研究装置の開発 電気学会電子デバイス研究会資料, EDD - 82, 47 - 56, 1 - 8.
- 若林 革 (2019). 独立型太陽光発電システムの設計・施工と評価 千葉職業能力開発短期大学校紀要, 23, 2 - 5.
- 山本 利一・牧野 亮哉 (2000). 太陽光発電システムの教材化と授業実践 日本産業技術教育学会誌, 42, 4, 183 - 188.
- 安森 偉郎・岡田 工・崔 一煥 (2023). 教育用太陽電池を用いて常夜灯電球を点灯させる教材の開発 東海大学教育開発研究センター紀要, 8, 20 - 30.

(2025 年 1 月 14 日 受理)