

令和 4 年 5 月 29 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00773

研究課題名（和文）IoT機器デバイス応用を目指した高電圧両面受光5接合シリコン薄膜太陽電池

研究課題名（英文）High Voltage Bifacial Amorphous Si Quintuple-Junction Solar Cells for IoT Devices

研究代表者

小長井 誠（Konagai, Makoto）

東京都市大学・付置研究所・教授

研究者番号：40111653

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,000,000円

研究成果の概要（和文）：IoTデバイス向けの独立電源として、低照度でも動作可能な両面受光・多接合アモルファスSi太陽電池を開発した。プラズマCVD法によるi層膜厚やバンドギャップの最適化、ドープ層への微結晶相の導入、種々の漏れ電流の抑制技術開発などにより、6接合太陽電池で、1000 lxの照射下で4.56V、100 lxという超低照度下でも3.91Vの開放電圧を得た。また、ガラス基板に加えて、ポリイミドフィルム上へのフレキシブル多接合太陽電池の作製に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、センサ等のIoT機器用独立電源としての高電圧太陽電池を開発した。太陽電池を用いる場合の課題は、動作電圧を高めるための配線技術である。従来技術では、動作電圧を高めるためレーザー加工を用いた集積化技術が広く用いられてきた。一方、本研究では、レーザー加工を用いなくても、多接合太陽電池構造を用いれば、センサを十分駆動可能な高電圧が得られることを実証した。またガラス基板に加えて、フレキシブルなフィルム上への形成に成功した。フレキシブル多接合アモルファスシリコン太陽電池を用いれば、mmサイズの小さなものから、数mサイズのものまで、用途に応じて大きなフィルムから切り出すことが可能である。

研究成果の概要（英文）：As an independent power source for IoT devices, we have developed a bifacial multi-junction amorphous Si solar cell that can operate even in low illuminance. With the aim of improving the characteristics, we optimized the i-layer film thickness and bandgap by the plasma CVD method, introduced a microcrystalline phase into the dope layer, and developed various leakage current suppression technologies. As a result, we succeeded in preparing a 6-junction amorphous Si solar cell showing an open circuit voltage of 4.56 V under irradiation of 1000 lx. In addition, we succeeded in obtaining an open circuit voltage of 3.91 V even under ultra-low illuminance of 100 lx. We have also succeeded in preparing a flexible multi-junction solar cell on a polyimide film in addition to a glass substrate.

研究分野：太陽電池と太陽光発電

キーワード：太陽電池 アモルファスシリコン 多接合太陽電池 両面受光 IoT機器用電源

## 1. 研究開発当初の背景

最近、センサ等の IoT 機器用の独立電源としての Energy Harvesting 技術開発に関する議論が活発になってきた。IoT 機器用独立電源として光をはじめ熱、振動、機械的エネルギーなど各種の Energy Harvesting 技術が提案されている。本研究では、これらの Energy Harvesting 技術の中でも特に太陽電池を用いた光電変換技術に注目した。太陽電池を用いれば、mm サイズの小さなものから、m サイズの大きなものまで、用途に応じて自由に設計可能である。

一方、太陽電池を IoT 機器の電源として用いる場合の課題は、動作電圧を高めるための配線技術である。従来、電卓や腕時計などの民生機器用の Si 薄膜太陽電池では、動作電圧を高めるためレーザ加工を用いた内部配線技術(集積化技術)が広く用いられてきた。民生機器用太陽電池の製造コストに占める集積化プロセスコストは大きい。また、集積回路の中に小さな独立電源として太陽電池を組み込むような用途では、従来のようにガラス基板上に形成されたものでは、対応できないという難点があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、レーザ加工などの集積化技術を用いなくても、多接合太陽電池構造を用いれば、センサを十分駆動可能な高電圧が得られると考え、準備研究において 5 接合太陽電池を試作したところ、室内光を対象とした低照度下で 3.5V の開放電圧を得ることに成功している。本研究では、今後、室内照明の主流になるであろう LED 照明を対象に、IoT 向けのフレキシブルで高電圧の多接合アモルファス Si 太陽電池を開発することを目標とした。

内部配線のための集積化技術を用いずに低照度下で高い動作電圧を得るには、高品質ワイドギャップ Si 薄膜太陽電池の製膜技術開発、光を太陽電池の奥深くまで均一に導くための光学マネージメント、さらには、フレキシブル化の新技术開発など学術的な課題を解決する必要がある。

## 3. 研究の方法

本研究では、従来の集積化構造を用いなくても高い動作電圧を得るための多接合太陽電池を開発することを目指している。図 1 は、従来の民生機器用集積型 Si 薄膜太陽電池と、本研究で提案している多接合太陽電池を比較したものである。従来型のものでは、ガラス基板上に配置された太陽電池が横一列に直列接続されている。集積化構造の作製に際しては、透明導電膜(TCO)層、pin 構造を有する Si 薄膜太陽電池層、ならびに上部金属電極層をレーザ加工するプロセスが必要である。一方、本研究で提案している 5 接合太陽電池では、プラズマ CVD による Si 薄膜製膜時に多層構造を積層することによって、内部で直列に接続されるので、その後の集積化プロセスは不要となる。

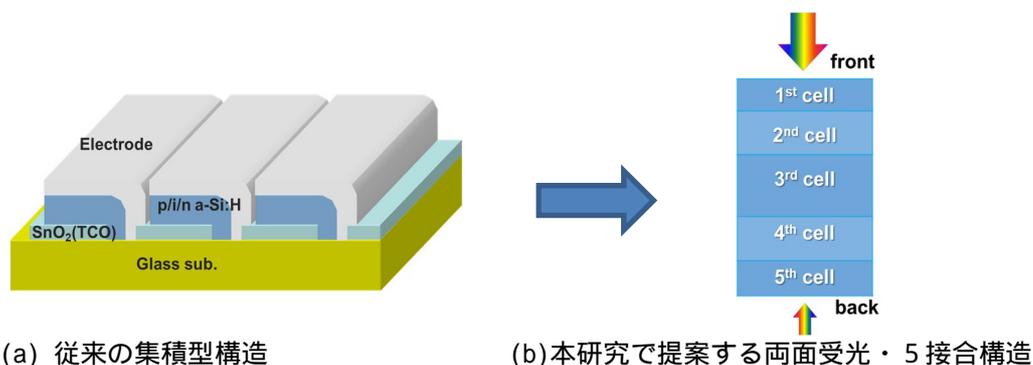


図 1 従来の集積型セルと 5 接合セルの相違

一方、多接合太陽電池で 3V 以上の動作電圧を得るには、5 接合構造が必要なる。多接合構造では、第 1 セルから第 5 セルまでの各セルで吸収されるフォトン数を一定にするには、第 3 セル～第 5 セルが非常に厚いものになってしまう。そこで、本研究では、製造面ならびに光電変換

性能の観点で実現可能な手法として、**両面受光構造**を提案した。両面受光構造では、表側のみならず裏側からも光照射が可能とした構造であり、各セルの厚さを非常に薄くすることが可能である。また、両面受光構造を平置きで使用する場合には、裏面に光が導入される構造が必要であり、**独自の光マネージメント技術**を提案した。さらに、**太陽電池のサイズ**は自由に調整可能で、しかもガラス基板からはぎ取って貼り付け可能な**フレキシブル化技術**を提案した。

## 4. 研究成果

### (1) ガラス基板上 5 接合および 6 接合太陽電池

当初、ガラス基板上の 5 接合太陽電池から研究を開始したが、期待以上の進展が見られたため、5 接合よりもさらに動作電圧を高めることが可能な 6 接合太陽電池も合わせて開発した。

図 2 は、pin 型セルを積み重ねた 6 接合太陽電池の構造を示している。n 型ドープ層には微結晶あるいはアモルファス相を用いた。図中の a-Si(0)層の膜厚は、代表的な設計値である。光吸収層である i 層は、中央部の 1 つないし 2 つのセルを除き、バンドギャップを若干増すため酸素を加えた a-SiO<sub>x</sub>:H とした。酸素量を増やすとバンドギャップは広がるが、膜質は低下するので、ここでは Si の 2% に抑えている。全体は両面受光を考慮して対称構造で、i 層の膜厚は、セル間の電流整合が取れるよう中央に向けて厚く、具体的にはドープ層の光吸収を無視した各セルでの光吸収量が等しくなるように設計した。セル間の接続は、p/n トンネル接合で実現している。全ての a-Si(O<sub>x</sub>):H 層は、前述の PE-CVD 装置を用いて大気中に取り出すことなく連続的に、外周部を除く基板全面に製膜した。

図 3 に、5 接合太陽電池と 6 接合太陽電池の開放電圧の照度依存性を示す。光強度が 1/10 になり、それに比例して光電流が減少したときの開放電圧の変化量  $V_{oc(1/10)}$  は、1 接合当たり 57 - 115 mV と予想される。実際、5 接合太陽電池と n 層の厚い 6 接合太陽電池では、200 ~ 3000 lx の範囲でこの値は約 62 mV である。しかしながら、200 lx 以下の低照度では開放電圧が大きくこの傾きより低下している。この原因としては、漏れ電流や i 層の膜質（欠陥準位の存在）が考えられる。

### (2) フレキシブルフィルム上多接合太陽電池の作製とその特性

本研究の目的の一つは、IoT デバイス向けに、どのような形状にも設置が容易で任意形状に切り取り可能なフレキシブル太陽電池を実現することにある。そのためには、製膜に問題のない耐熱性と平坦性を有し、かつ透明なフレキシブルフィルムを基板として用いる必要がある。そこで、基板フィルムとして、ガラス板上にスピコートした

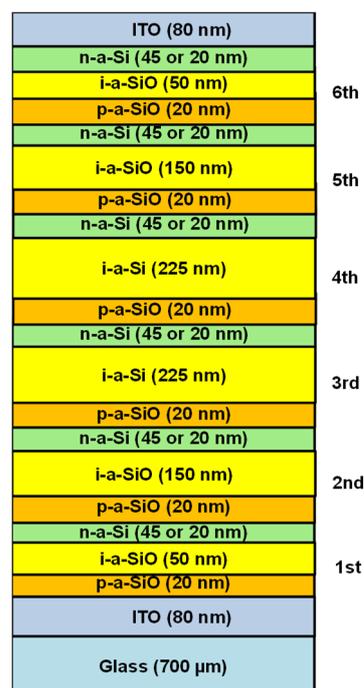


図 2 a-Si(0) 両面受光 6 接合太陽電池の構造模式図

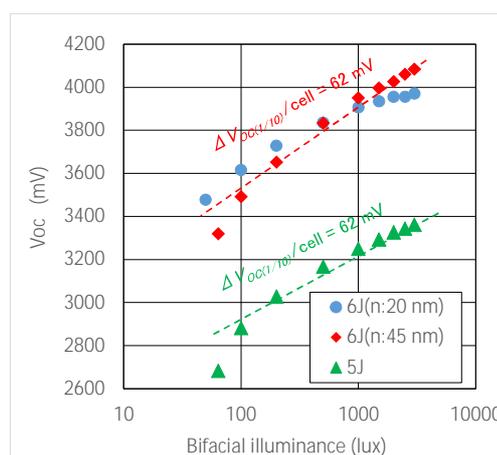


図 3 ガラス基板上 5 接合太陽電池および n 層厚の異なる 6 接合太陽電池の開放電圧の照度依存性

ポリイミド、ポリアミドを用いて、多接合太陽電池を作製した。スピコートしたポリイミドの膜厚は実測で23 $\mu\text{m}$ 、ユニアミドは25 $\mu\text{m}$ である。

これらのフィルムを特に洗浄せず、設定温度 150 で ITO 膜をスパッタした後、a-Si の製膜をガラス基板と同様に行った。スピコート以外のフィルムは、ガラス板にカプトンテープで固定して製膜した。スピコートのポリイミドは、ほぼガラス板と同様に扱った。セル特性を図 4 に、また透明アクリル上に貼り付けた様子を図 5 に示す。

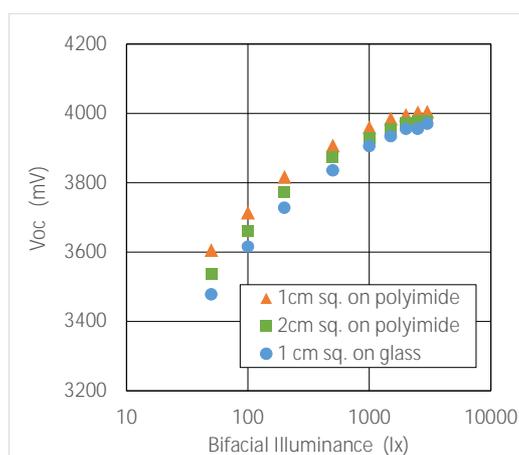


図 4 ガラス基板上およびスピコートしたポリイミド上に作製した6接合太陽電池の開放電圧の照度依存性。



図 5 透明アクリル棒に貼り付けたポリイミド上5接合太陽電池。

### (3) 光学マネージメント

多接合薄膜シリコン太陽電池を、一般的な太陽電池と同様な片面受光とした場合、裏面側に向かうほど i 層膜厚を厚くする設計となり、電圧をはじめとする性能面、プロセス面およびそれらに起因するコスト面について不利な状況となる。そこで、一方向からの光入射に対して、その光をセル裏面側にも導き、両面受光が可能となる光学基板の設計・試作・実証を行った(図 6)。白板ガラスを用いて試作した光学基板の一例を図 7 に示す。今回はガラス素材を用いたため、加工の都合により、Ag 反射面はパラボリックな形状ではなく、セル裏面側に約 40°で入射する平斜面形状とした。実際にこの光学基板とフレキシブル多接合太陽電池を組み合わせて片面照度下での特性を測定したところ、両面照射の 35%程度の光電流を得ることができた。

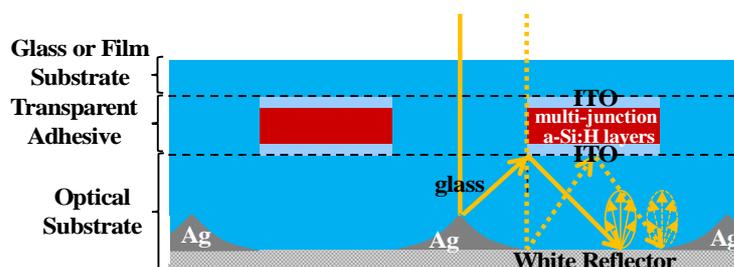


図 6 光学基板のコンセプト断面図

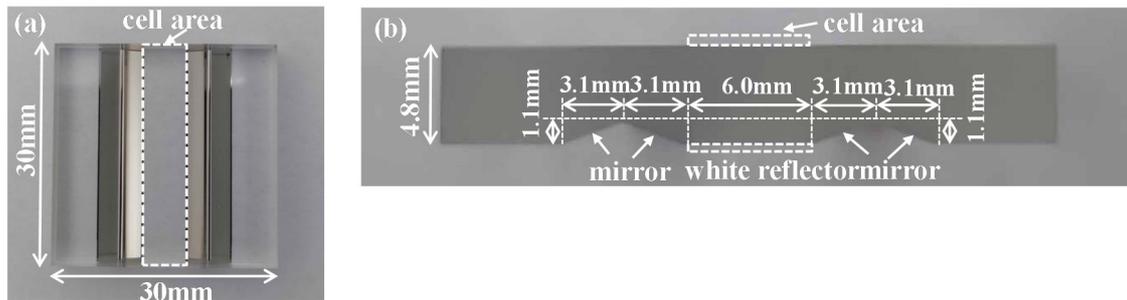


図7 試作した光学基板

(4) グラフェンを用いた剥ぎ取り・貼り付け技術

本研究では、グラフェン/ガラス基板にアモルファスシリコン太陽電池を作製し、ガラス基板から引き剥がしてフレキシブル化することを試みた。

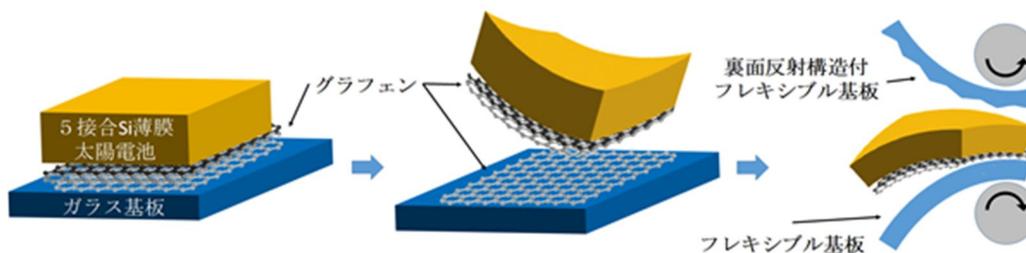


図8 グラフェンを用いた剥ぎ取り・貼り付け技術の概念図

まず触媒に銅箔を使用し、熱 CVD 装置を用いてグラフェンの製膜を行った。次に単層グラフェン / PMMA を基板へ転写し、その後、単層グラフェンを保護していた PMMA を除去しグラフェンの転写を行った。基板上に転写したグラフェンの上にアモルファスシリコンを堆積させた。グラフェン上にアモルファスシリコンを堆積させるプロセスで膜剥がれが生じたため防止策を検討した。グラフェンの転写時の残留水分が主要因と考え、転写後に真空アニールを行った。またグラフェンとアモルファスシリコンの間に ITO を積層化させた。これによって完全に膜の剥離を防ぐことができた。以上のプロセス開発により、PDMS を引き剥がし材としたプロセスを完成させ、フレキシブルアモルファスシリコン太陽電池の引き剥がしに成功した(図 9)。



図9 実際に引き剥がしたフレキシブルアモルファスシリコン太陽電池

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Makoto Konagai, Hiroshi Noge and Ryouzuke Ishikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Flexible Bifacial Amorphous Si Quintuple- and Sextuple-Junction Solar Cells for Internet of Things Devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Photovoltaics Res Appl.	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/pip.3335	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 Makoto Konagai and Ryo Sasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Bifacial Amorphous Si Quintuple-Junction Solar Cells for IoT Devices with High Open-Circuit Voltage of 3.5V under Low Illuminance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Prog. Photovol. Res. Appl.	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/pip.3215	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12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 野毛 宏、小長井 誠、石川 亮佑
2. 発表標題 両面受光6接合アモルファスSi太陽電池の動作シミュレーションと構造最適化
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Konagai, Hiroshi Noge and Ryouzuke Ishikawa
2. 発表標題 Flexible Bifacial Amorphous Si Quintuple- and Sextuple-Junction Solar Cells for IoT Devices
3. 学会等名 37th EU PVSEC 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimihiro Saito and Makoto Konagai
2. 発表標題 Optical Design of Bifacially Light Receiving by One-sided Light Incidence for Multi-junction Amorphous Silicon Solar Cells
3. 学会等名 PVSEC-30 & GPVC 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi NOGE, Makoto KONAGAI, and Ryousuke ISHIKAWA
2. 発表標題 Bifacial sextuple-junction amorphous SiLICON solar cells on GLASS and polyimide and the optimization of their i-layer thicknesses by optical simulation
3. 学会等名 PVSEC-30 & GPVC 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野毛 宏、小長井 誠、石川 亮佑
2. 発表標題 ポリイミド上6接合アモルファスSi太陽電池の作製と低照度特性の改善
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米村 百可、石川 亮佑、小長井 誠
2. 発表標題 5接合アモルファスシリコン太陽電池のフレキシブル化
3. 学会等名 第17回次世代の太陽光発電システムシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斎藤 公彦、小長井 誠
2. 発表標題 5 接合アモルファスシリコン太陽電池の片面光入射両面受光光学設計
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

1. 発表者名 小長井 誠、佐々木 峻、野毛 宏、石川 亮佑
2. 発表標題 平坦基板上に作製した6接合アモルファスSi太陽電池の低照度特性
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

1. 発表者名 Makoto Konagai; Ryo Sasaki
2. 発表標題 Bifacial Amorphous Si Quintuple-Junction Solar Cells for IoT Devices with High Open-Circuit Voltage of 3.5V under Low Illuminance
3. 学会等名 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryousuke Ishikawa; Momoka Yonemura; Ryo Sasaki; Makoto Konagai
2. 発表標題 Amorphous Si Quintuple-Junction Solar Cells on Graphene Layer for IoT Applications
3. 学会等名 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conf. (PVSEC-29)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木 峻; 米村 百可; 石川 亮佑; 小長井 誠
2. 発表標題 5 接合アモルファスSi太陽電池の低照度下での発電特性
3. 学会等名 第16回 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小長井 誠; 佐々木 峻; 米村 百可; 石川 亮佑
2. 発表標題 5 接合アモルファスSi太陽電池の低照度下での特性改善
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

小長井・石川研究室「IoT応用に向けた高電圧アモルファスSi多接合太陽電池開発」 <a href="http://www.konagai-labo.org/research.html">http://www.konagai-labo.org/research.html</a> 小長井・石川研究室 <a href="http://www.konagai-labo.org/">http://www.konagai-labo.org/</a>
---

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 亮佑  (Ishikawa Ryouzuke)  (50637064)	東京都市大学・付置研究所・准教授    (32678)	

6. 研究組織（つづき）

	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	齊藤 公彦  (Saito Kimihiko)  (70704203)	福島大学・共生システム理工学類・特任教授    (11601)	

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