

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05107

研究課題名(和文) シリコンナノ粒子太陽電池の粒径制御による3次元周期配列構造の構築と高セル性能化

研究課題名(英文) Establishment of three-dimensional periodically arranged structures of size-controlled silicon nanoparticles based solar cells and high cell performance

研究代表者

佐藤 慶介 (Sato, Keisuke)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：70366384

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンナノ粒子太陽電池は、原料費の大幅削減による太陽電池の価格低減が可能であり、発電効率も理論上50%以上に向上できるため、太陽電池の普及拡大に向けて期待されている。本研究では、不純物ドーピングしたシリコンナノ粒子を安価なウェットプロセスにより創製し、安価な有機ポリマーとの組み合わせにより低コストな太陽電池を開発した。本研究成果は、n型もしくはp型ナノ粒子の粒径制御技術、下地テクスチャー基板へのナノ粒子の周期的配列制御技術、ナノ粒子を用いた太陽電池の簡易創製技術を確立し、10.7%の発電効率を得た。さらにセル構造内に電子輸送層を導入することで短絡電流密度を10%以上に向上させる技術も確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、コスト低減に有益なウェットプロセスにより製造したn型もしくはp型シリコンナノ粒子に対して粒径ならびに3次元周期配列の制御技術を確立したことで現状約11%の発電効率を有した太陽電池を開発できた。この研究成果は、我が国の政策である再生エネルギーの導入量とエネルギー効率の向上に貢献できる。特に、発電コスト低減に寄与する材料・製造コスト削減と発電効率向上の両立に貢献でき、環境エネルギー問題に取り組む我が国の太陽電池の普及拡大に寄与するものである。よって、本研究で得られた成果は、量子ドット太陽電池や新規太陽電池の開発において基幹技術となるため、学術的および社会的に非常に大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：Silicon (Si) nanoparticles based solar cells are expected to expand the use of solar cells because they can reduce the manufacturing cost of solar cells by significantly reducing the cost of raw materials and can theoretically increase the power conversion efficiency (PCE) by more than 50%. In this research project, impurity-doped Si nanoparticles were fabricated by an inexpensive wet process and combined with inexpensive organic polymers to develop a low-cost solar cell. We have established a technique to control the size of n- or p-type nanoparticles, a technique to control the periodic arrangement of nanoparticles on the texture-structured substrate, and a facile preparation technique for solar cells using nanoparticles, and obtained a PCE of 10.7%. Furthermore, we have established a technology to improve the short-circuit current density to more than 10% by introducing an electron transport layer in the cell structure.

研究分野：ナノ多機能材料創製

キーワード：シリコンナノ粒子 不純物ドーピング 粒径制御 テクスチャー構造 ナノ粒子配列制御 ウェットプロセス 無機有機太陽電池 発電効率

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、結晶シリコンとアモルファスシリコンで構成されるシリコン太陽電池は、光電変換材料の劣化が少なく、長期間にわたり安定した発電効率が得られるため、一般家庭や工場等で再生可能なエネルギー源として最も普及している。中でも、電力用太陽電池は生産量の大半を占めている。更に普及を加速させるためには、シリコン太陽電池の価格低減ならびに理論限界(約30%)に近づいている発電効率の向上が必要となっている。この課題を克服するために、数年前より、シリコンナノ粒子(量子ドット)を用いた量子ドット太陽電池の開発が進められている。シリコンナノ粒子の利用は、原料費の大幅削減により太陽電池の価格低減が見越せるだけでなく、発電効率も理論上50%以上に向上できるため、太陽電池の普及拡大に向けた最重要材料の一つとして考えられている。しかしながら、シリコンナノ粒子太陽電池の発電効率は現在までに報告されている研究レベルでの最高値として、18.2%であり、理論限界に近づけるための光電変換層の最適化が必要不可欠となっている。また、近年、価格低減を見越せ、汎用性の高いことで注目されている太陽電池として、シリコンナノ粒子と導電性ポリマーを複合化した太陽電池が開発されている。しかしながら、その発電効率は現状7.3%程度であり、発電効率の向上にはナノ粒子層から電極へのキャリア輸送効率の向上が必要不可欠となっている。そこで、太陽光の吸収によりシリコンナノ粒子内で生成されたキャリアを効率よく電極へ輸送させるために、キャリアパスとして利用可能なシリコンナノ粒子の粒径を均一化することとシリコンナノ粒子の配列を制御することが普及拡大に向けた高効率シリコンナノ粒子太陽電池開発の鍵となる。

2. 研究の目的

本研究では、ナノ粒子間ならびにナノ粒子層と電極間のキャリア輸送効率の向上を目指し、以下の3項目について検討することを目的としている。

- (1) 不純物添加シリコンナノ粒子の粒径制御技術の確立
- (2) 基板上へのナノ粒子の3次元周期配列構造技術の確立
- (3) 光電変換層内へのキャリア輸送層の導入効果

以上より、高発電効率を示すシリコンナノ粒子太陽電池の創製技術を構築する。

3. 研究の方法

(1) 不純物添加シリコンナノ粒子の粒径制御技術の確立

不純物材料には、リンとボロンを用いた。リン添加シリコンナノ粒子は、研究代表者が考案した安価かつ簡易なウェットプロセスを用いて作製した。具体的には、直径100nmのシリコン粉末とリン含有溶媒をアルミナ基板に塗布し、900~1100°Cの温度で60分間熱拡散処理を行うことでリン添加シリコン粉末を生成した。このリン添加シリコン粉末をアルミナ基板から回収し、粉末を粉砕した。その後、容器内にリン添加シリコン粉末とフッ化水素酸/硝酸混合溶媒を入れ、高速攪拌処理による粉末のエッチングを行うことで直径5nm以下のリン添加シリコンナノ粒子を生成した。さらに、このナノ粒子を100,000rpmの回転速度で30分間の超遠心機による分級処理を行い、5nm以上のナノ粒子を除去した。

一方、ボロン添加シリコンナノ粒子も研究代表者が考案した安価かつ簡易なウェットプロセスを用いて作製した。ボロン添加剤には、ボロン含有溶媒とBN基板を用いた。具体的には、ボロン含有溶媒によるボロンドーピングとして、直径100nmのシリコン粉末とボロン含有溶媒をアルミナ基板に塗布し、1100°Cの温度で60分間熱拡散処理を行うことでボロン添加シリコン粉末を生成した。BN基板によるボロンドーピングとして、酸素雰囲気下で1100°Cの温度で60分間熱酸化処理したBN基板と直径100nmのシリコン粉末を塗布したアルミナ基板を貼り合わせ、1100°Cの温度で60分間熱拡散処理を行うことでボロン添加シリコン粉末を生成した。いずれの方法で生成したボロン添加シリコン粉末をアルミナ基板から回収し、粉末を粉砕した。その後、容器内にボロン添加シリコン粉末とフッ化水素酸/硝酸混合溶媒を入れ、高速攪拌処理による粉末のエッチングを行うことで直径5nm以下のボロン添加シリコンナノ粒子を生成した。さらに、このナノ粒子を50,000rpmの回転速度で5分間の超遠心機による分級処理を行い、5nm以上のナノ粒子を除去した。

生成したリンとボロン添加シリコンナノ粒子の粒度分布、不純物添加状態について評価した。

(2) 基板上へのナノ粒子の3次元周期配列構造技術の確立

ナノ粒子を塗布するための下地テンプレート基板として、ピラミッド基板、ナノホール基板、ナノワイヤ基板を作製した。ピラミッド基板は、林純薬工業社製 Pure Etch TAD80/水酸化カリウム混合溶媒内にシリコン基板を20分間浸漬させることで作製した。ナノホール基板は、硝酸銀/フッ化水素酸/純水混合溶媒とフッ化水素酸/過酸化水素/純水混合溶媒内にそれぞれシリコン基板を5秒間と30秒間浸漬させることで作製した。ナノワイヤ基板は、フッ化水素酸/硝酸混合溶媒内にナノホール基板を3分間浸漬させ、化学研磨エッチング処理により細孔部分を拡張することで作製した。次いで、スピンコーティング法により3種類の下地テンプレート基板表面にリンとボロン添加シリコンナノ粒子を3次的に配列させた。

作製した3種類の下地テンプレート基板に対して、アレイ構造の形態、ナノ粒子の配列状態について評価した。

(3) 光電変換層内へのキャリア輸送層の導入効果

太陽電池の製造コストを大幅に削減するために、リンとボロン添加シリコンナノ粒子と安価な有機系導電性ポリマーを複合化した太陽電池を製造した。リン添加シリコンナノ粒子を用いた太陽電池では、ナノ粒子としてリン添加時の加熱温度を可変させた試料、分級処理によりナノ粒子の粒径制御した試料、ナノ粒子表面の親水化処理によりナノ粒子/導電性ポリマー間の親和性制御した試料を用い、有機系導電性ポリマーとして(ポリ(4-スチレンスルホン酸))をドーブしたポリ(3,4-エチレンジオキシチオフェン): PEDOT:PSS)を用い、下地テンプレート基板としてピラミッド基板、ナノホール基板、ナノワイヤ基板を用いた。ナノ粒子表面への親水化処理には、親水性官能基であるアミノ基を有したシランカップリング剤((3-アミノプロピル)トリエトキシシラン (APTES))を用いた。ピラニア処理によりヒドロキシ基を修飾したリン添加シリコンナノ粒子を40に温めたAPTES溶媒に浸漬させ、300rpmの回転数で10~60分間攪拌することでナノ粒子表面を親水化した。これらの材料に対して、スピンコーティング法により3種類の下地テンプレート基板表面に各種リン添加シリコンナノ粒子を2500rpmの回転数で3秒間、PEDOT:PSSを2500rpmの回転数で10秒間と7500rpmの回転数で120秒間スピンコートした。その後、スパッタリング装置を用いて表面電極としてPEDOT:PSS層表面に櫛型銀電極、裏面電極として下地テンプレート基板裏面にアルミニウム電極を形成することで太陽電池を作製した。

一方、ボロン添加シリコンナノ粒子を用いた太陽電池では、ナノ粒子としてボロン添加剤を可変させた試料、分級処理によりナノ粒子の粒径制御した試料を用い、有機系導電性ポリマーとしてPEDOT:PSSを用い、下地テンプレート基板としてピラミッド基板を用いた。これらの材料に対して、スピンコーティング法により下地テンプレート基板表面に各種ボロン添加シリコンナノ粒子を2500rpmの回転数で3秒間、PEDOT:PSSを2500rpmの回転数で10秒間と7500rpmの回転数で120秒間スピンコートした。その後、表面電極としてPEDOT:PSS層表面に櫛型銀電極、裏面電極として下地テンプレート基板裏面にアルミニウム電極を形成することで太陽電池を作製した。

次いで、ボロン添加シリコンナノ粒子を用いた太陽電池に対して、電子輸送層としての機能を有した酸化亜鉛(ZnO)層を導入した太陽電池の作製も行った。下地テンプレート基板表面への各種ボロン添加シリコンナノ粒子とPEDOT:PSSのスピンコートは、前述した条件と同一とした。その後、スパッタリング装置を用いて表面電極としてPEDOT:PSS層表面に櫛型銀電極、下地テンプレート基板裏面にZnO層と裏面電極としてアルミニウム電極を形成することで太陽電池を作製した。ZnO層は、膜厚を可変させるために3~10分間堆積した。

作製した太陽電池は、ソーラーシミュレータによる電流密度-電圧測定、分光感度・量子効率測定によりセル性能を評価した。また、リン添加シリコンナノ粒子を用いた太陽電池に対しては親水化処理後のナノ粒子表面の化学結合状態、ボロン添加シリコンナノ粒子を用いた太陽電池に対してはZnO層の結晶構造について評価した。

4. 研究成果

(1) 不純物添加シリコンナノ粒子の粒径制御技術の確立

リン添加シリコンナノ粒子の粒度分布について動的光散乱(DLS)装置を用いて分析した結果、分級処理前のナノ粒子では約5nmと150nm付近に直径のピークを有した粒度分布が観測された。一方、分級処理後のナノ粒子では平均直径1.35nm、標準偏差 ± 0.5 nmの狭い分布幅から成る粒度分布が観測された。この結果より、遠心分離により粒径制御されたナノ粒子を得ることに成功した。

ボロン添加シリコンナノ粒子の粒度分布についてDLS装置を用いて分析した結果、ボロン含有溶媒を用いたナノ粒子では約1.3nm付近に直径のピークを有した粒度分布が観測された。一方、BN基板を用いたナノ粒子では約1.4nm付近に直径のピークを有した粒度分布が観測された。この結果より、いずれのボロン添加剤を用いた場合でも遠心分離により粒径制御されたナノ粒子を得ることに成功した。

リン添加シリコンナノ粒子内のリン添加状態について電子スピン共鳴(ESR)装置を用いて分析した結果、900以上の熱拡散温度で作製したナノ粒子に対して、ナノ粒子コア内に添加されたリン原子により生成された伝導電子に起因するg値が1.998のESR信号が検出された。熱拡散温度を900から1100まで増加させると、g値が1.998のESR信号強度の増加が確認された。これは、熱拡散温度がナノ粒子コア内のリン添加量に影響をもたらしているためである。900の熱拡散温度の場合、直径100nmのシリコン粉末コアへのリン原子の拡散が十分に行われておらず、その後の微粒化プロセスでリン添加された領域の大部分がエッチングされたことで低いESR信号強度を示した。一方、熱拡散温度を1100に増加させた場合、シリコン粉末コアへのリン原子の拡散が十分に行われたことで、微粒化プロセス後もコア部分にリン原子が残存したために高いESR信号強度を示した。この結果より、1100で熱拡散したナノ粒子は、高濃度のリン原子がシリコン結晶格子内の置換位置に局在した状態で存在していることが示唆された。

ボロン添加シリコンナノ粒子内のボロン添加状態について顕微ラマン分光装置を用いて分析した結果、ボロン含有溶媒とBN基板を用いて1100の熱拡散温度で作製したナノ粒子に対して、 519 cm^{-1} 付近にシリコン光学フォノンピークの高波数側への非対称なブロードニング波形が観測された。この波形は、ボロン添加シリコン結晶の間接的価電子帯への正孔遷移のラマン散乱

と離散的光学フォノンのラマン散乱の干渉による Fano 効果により観測されることから、高濃度のボロン原子がシリコン結晶格子内の置換位置に局在した状態で存在していることが示唆された。また、 618cm^{-1} と 640cm^{-1} 付近にシリコン結晶格子内の $^{11}\text{B-Si}$ 結合と $^{10}\text{B-Si}$ 結合に由来した局在振動ピークも観測された。これらの局在振動ピークの信号強度は、BN 基板で作製したナノ粒子に比べてボロン含有溶媒で作製したナノ粒子の方が増加傾向を示した。この結果より、いずれのボロン添加剤を用いた場合でもシリコン結晶格子内にボロンが添加されているが、その添加量はボロン含有溶媒を用いた方が高いことが示唆された。

(2) 基板上へのナノ粒子の 3 次元周期配列構造技術の確立

ピラミッド基板、ナノホール基板、ナノワイヤ基板の形態について走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて分析した結果、約 $1\mu\text{m}$ の高さでピッチ幅で構成されたピラミッド構造、約 500nm の深さと約 70nm の周期 (細孔径: 約 20nm) で構成されたナノホール構造、約 500nm の深さと約 75nm の周期 (細孔径: 約 40nm) で構成されたナノワイヤ構造が基板全面に一樣に形成されていることが確認された。

ピラミッド基板、ナノホール基板、ナノワイヤ基板の表面に 3 次元的に配列させたリンとボロン添加シリコンナノ粒子の配列状態について SEM を用いて分析した結果、ピラミッド基板ではピラミッドの斜面に沿ってナノ粒子が配列していることが確認された。ナノホール基板では、細孔径が狭いことで細孔底部へのナノ粒子の充填が十分ではなく、細孔深度に対しておおよそ半分程度の深さまでしか充填されていないことが確認された。一方、ナノホール基板の細孔径を約 2 倍に拡張したナノワイヤ基板では、細孔底部 (ナノワイヤの間の空隙部分) までナノ粒子が充填された状態で配列していることが確認された。この結果より、ピラミッド基板とナノワイヤ基板においてナノ粒子を周期的に配列できることが示唆された。

(3) 光電変換層内へのキャリア輸送層の導入効果

熱拡散温度を可変させたリン添加シリコンナノ粒子とピラミッド基板を組み合わせた太陽電池のセル性能についてソーラーシミュレータによる電流密度 - 電圧測定を用いて分析した結果、熱拡散温度の増加に伴い発電効率の増加が認められた。熱拡散温度が 1100 のナノ粒子を用いた太陽電池は、 $35.2\text{mA}/\text{cm}^2$ の短絡電流密度、 0.389V の開放電圧、 0.528 の曲線因子を示し、 7.24% の発電効率が確認された。これは、リン添加効果によるナノ粒子の導電性向上とナノ粒子効果による非放射エネルギー移動 (キャリア移動) 効率の向上により生じていることが示唆された。

親水化処理後のリン添加シリコンナノ粒子表面の化学結合状態についてフーリエ変換赤外分光 (FTIR) 装置を用いて分析した結果、 460cm^{-1} と $1044 \sim 1130\text{cm}^{-1}$ 付近にシリコンと APTES の結合と APTES 同士の結合に由来したシロキサン (Si-O-Si) 基の scissoring mode と asymmetric stretching mode の IR 吸収ピーク、 $1484 \sim 1562\text{cm}^{-1}$ と 3370cm^{-1} 付近にアミノ基 (NH_2) に由来した deformation mode と asymmetric stretching mode の IR 吸収ピーク、 2883cm^{-1} と 2932cm^{-1} 付近にシロキサン基とアミノ基の間に結合する CH_2 の stretching mode と asymmetric stretching mode の IR 吸収ピークが観測された。この結果より、リン添加シリコンナノ粒子表面には親水性官能基であるアミノ基がシロキサン基と CH_2 を介して結合していることが示唆された。

分級処理による粒径制御と親水化処理したリン添加シリコンナノ粒子とピラミッド基板を組み合わせた太陽電池のセル性能についてソーラーシミュレータによる電流密度 - 電圧測定を用いて分析した結果、30 分間の APTES 修飾時間に対して $34.2\text{mA}/\text{cm}^2$ の短絡電流密度、 0.455V の開放電圧、 0.589 の曲線因子を示し、 9.16% の高い発電効率を示した。これは、粒径の均一化によるシャント抵抗成分の増加に伴う電力損失の抑制に加え、APTES 修飾によるナノ粒子表面に存在する欠陥の除去と親水性官能基であるアミノ基修飾によるナノ粒子/親水性 PEDOT:PSS 間の親和性向上に伴う密着性向上により生じていることが示唆された。この結果より、リン添加シリコンナノ粒子への粒径制御と親水化処理は、開放電圧と曲線因子の改善に有効であり、親水化処理前の太陽電池に比べて発電効率を約 1.3 倍に増大できることが明らかになった。

分級処理による粒径制御と親水化処理したリン添加シリコンナノ粒子とナノホール基板を組み合わせた太陽電池のセル性能についてソーラーシミュレータによる電流密度 - 電圧測定を用いて分析した結果、 $34.3\text{mA}/\text{cm}^2$ の短絡電流密度、 0.391V の開放電圧、 0.620 の曲線因子を示し、 8.31% の発電効率を示した。この太陽電池は、ピラミッド基板を用いた太陽電池と比べると曲線因子の向上が見られたが、全体としての性能は低下した。これは、ナノホール基板に形成した細孔径が狭いことでナノ粒子と PEDOT:PSS の細孔底部への充填が不十分となり、その結果、発電に必要な p/n 界面領域が限定されたことにより生じていることが示唆された。

分級処理による粒径制御と親水化処理したリン添加シリコンナノ粒子とナノワイヤ基板を組み合わせた太陽電池のセル性能についてソーラーシミュレータによる電流密度 - 電圧測定を用いて分析した結果、 $35.3\text{mA}/\text{cm}^2$ の短絡電流密度、 0.457V の開放電圧、 0.661 の曲線因子を示し、 10.7% の最も高い発電効率を達成した。これは、ナノホール基板の細孔径を約 2 倍に拡張したナノワイヤ基板の使用によるナノ粒子と PEDOT:PSS の細孔底部 (ナノワイヤの間の空隙部分) ま

での充填に伴う p/n 界面領域の劇的な拡張と化学研磨エッチング処理によるナノワイヤ表面の欠陥除去に伴うキャリア輸送効率の増大により生じていることが示唆された。この結果より、粒径制御と親水化処理したリン添加シリコンナノ粒子とナノワイヤ基板の組み合わせは、短絡電流密度、開放電圧、曲線因子の大幅な改善に有効であり、ピラミッド基板使用時よりも発電効率をさらに約 1.2 倍に増大できることが明らかになった。

ボロン添加剤の可変と分級処理による粒径制御したボロン添加シリコンナノ粒子とピラミッド基板を組み合わせた太陽電池のセル性能についてソーラーシミュレータによる電流密度 - 電圧測定を用いて分析した結果、ボロン含有溶媒の使用時では $31.5\text{mA}/\text{cm}^2$ の短絡電流密度、 0.436V の開放電圧、 0.587 の曲線因子を示し、 8.06% の発電効率を示した。一方、BN 基板の使用時では短絡電流密度は $32.8\text{mA}/\text{cm}^2$ に増加したが、開放電圧 (0.272V) と曲線因子 (0.534) は減少し、発電効率も 4.76% まで低下した。この結果より、ボロン含有溶媒の使用においてボロン添加効果によるナノ粒子の導電性向上とナノ粒子効果による非放射エネルギー移動(キャリア移動)効率の向上により発電効率を向上できることが明らかになった。

ZnO 層の結晶構造について X 線回折 (XRD) 装置を用いて分析した結果、 34° 、 36° 、 62° 付近に六方ウルツ鉱構造の ZnO 結晶の (002) 面、(101) 面、(103) 面にそれぞれ由来した回折ピークが観測された。また、顕微ラマン分光装置を用いて分析した結果、 436cm^{-1} 、 571cm^{-1} 、 1148cm^{-1} 付近に六方ウルツ鉱構造の ZnO 結晶格子内の xy 平面の振動である E モード (酸素に関する高波数側の振動モード $E_2(\text{high})$)、z 軸に沿った振動である A モード (縦振動成分の $A_1(\text{LO})$ 、 2LO) にそれぞれ由来した振動ピークが観測された。この結果より、作製した ZnO 膜は六方ウルツ鉱構造を有した結晶であることが示唆された。

ボロン添加剤の可変と分級処理による粒径制御したボロン添加シリコンナノ粒子、ピラミッド基板、ZnO 層 (5 分間堆積に対して 24nm の膜厚) を組み合わせた太陽電池のセル性能についてソーラーシミュレータによる電流密度 - 電圧測定を用いて分析した結果、ボロン含有溶媒の使用時では $36.2\text{mA}/\text{cm}^2$ の短絡電流密度、 0.385V の開放電圧、 0.537 の曲線因子を示し、 7.50% の発電効率を示した。この太陽電池は、電子輸送層である ZnO 層の導入により、導入前の太陽電池と比べて短絡電流密度の向上が見られたが、全体としての性能は低下した。これは、ボロン含有溶媒に含まれた副生物がセル内に混入したことでシャント抵抗成分の低下に伴う電力損失の増加が生じたためであった。一方、BN 基板の使用時では短絡電流密度は $36.3\text{mA}/\text{cm}^2$ であったが、開放電圧 (0.415V) と曲線因子 (0.572) は増加し、発電効率も 8.61% まで増大した。この太陽電池は、ボロン含有溶媒を使用した太陽電池と比べて全ての性能に向上が見られた。これは、BN 基板を使用したことによる副生物のセル内への混入の抑制により生じていることが示唆された。この結果より、粒径制御したボロン添加シリコンナノ粒子と ZnO 層の組み合わせは、短絡電流密度の大幅な改善に有効であり、ZnO 層導入前の太陽電池よりも発電効率を約 1.1 倍に増大できることが明らかになった。

国内外において温室効果ガスの削減に関する取り組みが実施されている。日本でもこの目標を達成するために、再生エネルギーの導入量を増やすこととエネルギーの効率化の追求が必要となり、太陽電池の普及拡大が重要な取り組みとなっている。本研究で得られた成果は、再生エネルギーの中核となる太陽電池に対して発電効率の向上と簡易な製造方法による低コスト化の両立を目指す実用化に向けた要素研究を実施した。今後、更なる発電効率の向上に向けた研究を実施することで温室効果ガスの削減目標を実現できるため、その実現につながる成果として位置づけている。また、本研究で開発した汎用性の高い有機材料と性能向上を見越せる無機ナノ材料を組み合わせた太陽電池は、電池開発の基幹技術として学術的、産業的、経済的にも非常に大きな意義があり、我が国の低炭素社会の実現に向けた将来的貢献度は極めて高いといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K. Kato, K. Sato, N. Fukata, K. Hirakuri	4. 巻 19
2. 論文標題 Photovoltaic performance of inorganic-organic heterojunction solar cells using boron-doped silicon nanoparticles with controlled conductance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nanoscience and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 2913-2924
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1166/jnn.2019.15827	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 Y. Sugano, K. Sato, N. Fukata, K. Hirakuri	4. 巻 4
2. 論文標題 Effect of texture of antireflection layer on photovoltaic performance of silicon/PEDOT:PSS hybrid solar cells	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Nanotechnology and Materials Science	6. 最初と最後の頁 6-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15436/2377-1372.17.1365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 佐藤慶介、井口翼、加藤桂太、平栗健二	4. 巻 62
2. 論文標題 かき混ぜるだけで作れる高品質蛍光ナノ粒子	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 化学工業社 ケミカルエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 36-43
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 無
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 鈴木雅之、佐藤慶介、平栗健二	4. 巻 102
2. 論文標題 リン添加シリコン系複合微結晶の蛍光特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 照明学会誌	6. 最初と最後の頁 211-214
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49件(うち招待講演 1件/うち国際学会 24件)

1. 発表者名 K. Sato, K. Furuya, N. Ikeda
2. 発表標題 Boron-doping effect on photovoltaic performances of silicon nanoparticle/organic polymer hybrid solar cells
3. 学会等名 The 4th edition of Nanotech France 2018 International Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Furuya, K. Sato
2. 発表標題 Photovoltaic performance of inorganic/organic hybrid solar cells using boron-doped silicon nanoparticles
3. 学会等名 Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces (PACSURF 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Ikeda, K. Sato
2. 発表標題 Photovoltaic performance of organic polymer solar cells using silicon nanoparticles with various phosphorus contents
3. 学会等名 Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces (PACSURF 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Takase, K. Sato
2. 発表標題 Effect of phosphorus-doping on photovoltaic performance of Si nanoparticles/polymer hybrid solar cells
3. 学会等名 Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces (PACSURF 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Saito, K. Sato
2. 発表標題 Effect of amino modification on photovoltaic performance of silicon/polymer solar cells with porous desert structures
3. 学会等名 Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces (PACSURF 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Saito, K. Sato
2. 発表標題 The effect of the amino-modification and CPE treatment on photovoltaic performance of porous desert structured silicon/PEDOT:PSS solar cells
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Materials and Chemical Engineering (MACE 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤慶介
2. 発表標題 機能性ナノ粒子で創るグリーンエネルギー
3. 学会等名 イノベーション・ジャパン2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高瀬正峻、深田直樹、佐藤慶介
2. 発表標題 シリコンナノ粒子/有機ポリマー太陽電池のセル性能におけるリン添加の効果
3. 学会等名 第79回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古屋邦祥、深田直樹、佐藤慶介
2. 発表標題 ポロンドープシリコンナノ粒子を用いた無機有機複合太陽電池のセル性能
3. 学会等名 第79回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤健人、深田直樹、佐藤慶介
2. 発表標題 細孔構造を有するシリコン/ポリマー太陽電池へのアミノ基修飾によるセル性能評価
3. 学会等名 第79回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 押見知明、佐藤慶介
2. 発表標題 シリコン系複合微粒子のシリコン/有機ポリマー太陽電池への応用
3. 学会等名 日本材料学会 第4回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤健人、佐藤慶介
2. 発表標題 表面修飾したシリコン/有機ポリマー太陽電池におけるpn界面親和性向上
3. 学会等名 日本材料学会 第4回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安澤宝史、佐藤慶介
2. 発表標題 表面修飾したSiナノ粒子を用いた無機有機太陽電池のセル性能向上
3. 学会等名 日本材料学会 第4回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田直希、深田直樹、佐藤慶介
2. 発表標題 リン添加量を変化させたシリコンナノ粒子/有機ポリマー太陽電池のセル性能
3. 学会等名 日本材料学会 第4回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤慶介
2. 発表標題 安価な手法で創れるナノ構造体を利用した太陽電池創製技術
3. 学会等名 TIRIクロスミーティング2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sato, N. Fukata, K.Hirakuri
2. 発表標題 Cell performances of inorganic/organic hybrid solar cells using silicon nanoparticles
3. 学会等名 9th Internatioinal Conference on Advanced Nano Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤健人、深田直樹、佐藤慶介
2. 発表標題 シリコン/有機ポリマー太陽電池への円筒状細孔形成の最適化
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤桂太、佐藤慶介、平栗健二
2. 発表標題 無機有機太陽電池内におけるポロンドープシリコン量子ドットの効果
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井口翼、佐藤慶介、平栗健二
2. 発表標題 ウェットプロセスによるリン添加シリコンナノ粒子の作製および評価
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤慶介
2. 発表標題 ナノ構造体 クリーンなエネルギーを創る
3. 学会等名 JST新技術説明会
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Kato, K. Sato, K. Hirakuri
2 . 発表標題 Boron-doping effect on photovoltaic performance of silicon quantum dots based organic polymer solar cells
3 . 学会等名 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Iguchi, K. Sato, K. Hirakuri
2 . 発表標題 Fabrication and evaluation of phosphorus-doped silicon nanoparticles using a wet process
3 . 学会等名 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Saito, K. Sato
2 . 発表標題 Photovoltaic performances of silicon/organic polymer solar cells with orderd cylindrical pore arrays
3 . 学会等名 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Yasuzawa, K. Sato
2 . 発表標題 Effect of alkyl-modification on the near-infrared fluorescence from silicon nanoparticles
3 . 学会等名 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kato, K. Sato, K. Hirakuri
2. 発表標題 Influence of boron concentration in silicon quantum dots on organic polymer solar cells
3. 学会等名 The International Conference on Engineering and Applied Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Suzuki, K. Sato, K. Hirakuri
2. 発表標題 Effect of surface composition on fluorescence properties of porous silicon films with ordered micropores
3. 学会等名 The International Conference on Engineering and Applied Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤慶介
2. 発表標題 ナノ構造体で創るクリーンなエネルギー
3. 学会等名 第2回CRCフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sato, K. Furuya, N. Ikeda
2. 発表標題 Boron-doping effect on photovoltaic performances of silicon nanoparticle/organic polymer hybrid solar cells
3. 学会等名 The 4th edition of Nanotech France 2018 International Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内藤竜也、佐藤慶介
2. 発表標題 化学研磨エッチング処理を施した無機/有機太陽電池の性能評価に関する研究
3. 学会等名 2019年電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 押見知明、佐藤慶介
2. 発表標題 シリコン/有機ポリマー太陽電池におけるpn界面作製の温度依存性
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬正峻、佐藤慶介
2. 発表標題 逆ピラミッド基板を用いたSi/PEDOT:PSS太陽電池の性能評価
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古屋邦祥、深田直樹、佐藤慶介
2. 発表標題 Siナノ粒子/PDEDOT:PSS太陽電池に使用するSiナノ粒子へのボロンドーピング方法の検討
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田直希、深田直樹、佐藤慶介
2. 発表標題 リン添加シリコンナノ粒子/有機ポリマー太陽電池の界面改質による性能評価
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土橋裕太、佐藤慶介
2. 発表標題 シリコン/有機太陽電池へのTiO ₂ 層の塗布方法の検討
3. 学会等名 日本材料学会 第5回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬正峻、佐藤慶介
2. 発表標題 逆ピラミッド構造と裏面障壁層を導入したSi/PEDOT:PSS太陽電池の性能評価
3. 学会等名 日本材料学会 第5回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古屋邦祥、佐藤慶介
2. 発表標題 ZnO電子輸送層を導入したシリコンナノ粒子/PEDOT:PSS太陽電池のセル性能評価
3. 学会等名 日本材料学会 第5回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田直希、佐藤慶介
2. 発表標題 表面修飾を施したリン添加シリコンナノ粒子/有機ポリマー太陽電池の性能評価 - 修飾時間と性能の相関性 -
3. 学会等名 日本材料学会 第5回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 押見知明、佐藤慶介
2. 発表標題 シリコン系複合微粒子を用いたシリコン/有機ポリマー太陽電池のUV領域における性能向上の検討
3. 学会等名 日本材料学会 第5回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内藤竜也、佐藤慶介
2. 発表標題 無機/有機太陽電池へのBack Surface Field導入効果
3. 学会等名 日本材料学会 第5回材料WEEK 「若手学生研究発表会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yasuzawa and K. Sato
2. 発表標題 Improved photovoltaic performance of organic/inorganic solar cells using surface-modified Si nanoparticles
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Materials and Chemical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Saito and K. Sato
2 . 発表標題 The effect of the amino-modification and CPE treatment on photovoltaic performance of porous desert structured silicon/PEDOT:PSS solar cells
3 . 学会等名 The 3rd International Conference on Materials and Chemical Engineering (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Ikeda and K. Sato
2 . 発表標題 Annealing effects of phosphorus-doping on photovoltaic performance of phosphorus-doped silicon nanoparticles/organic polymer solar cells
3 . 学会等名 Global Engineering and Applied Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Furuya and K. Sato
2 . 発表標題 Optimization of boron-doping techniques for boron-doped silicon nanoparticles solar cells
3 . 学会等名 2nd International Conference on novel functional materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Takase and K. Sato
2 . 発表標題 Photovoltaic performance of inverted pyramidal structured Si/PEDOT:PSS solar cells
3 . 学会等名 2nd International Conference on novel functional materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Ikeda and K. Sato
2. 発表標題 Improvement of photovoltaic performance by surface modification to phosphorus-doped silicon nanoparticles
3. 学会等名 2nd International Conference on novel functional materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Naito and K. Sato
2. 発表標題 Introducing effect of back surface field in silicon/organic solar cells
3. 学会等名 2nd International Conference on novel functional materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Furuya and K. Sato
2. 発表標題 Photovoltaic performance of boron-doped silicon nanoparticles solar cells introducing ZnO electron transport layer
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Ikeda and K. Sato
2. 発表標題 Photovoltaic performance of solar cells combined phosphorus-doped silicon nanoparticles and silicon nanowires
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Takase and K. Sato
2. 発表標題 Performance of Si/PEDOT: PSS solar cells introduced inverted pyramidal structures and back surface barrier layer
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐藤慶介、齋藤健人、押見知明	4. 発行年 2019年
2. 出版社 (株)技術情報協会「ナノ粒子塗工液の調整とコーティング技術」	5. 総ページ数 527-542
3. 書名 第9節 シリコン - 有機ポリマー太陽電池における銀ナノ粒子を用いた低光反射率構造の創製技術	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 p型又はn型不純物含有シリコンナノ粒子の製造方法、太陽電池素子の製造方法、及び半導体デバイスの製造方法	発明者 佐藤慶介、平栗健二、井口翼、加藤桂太、菅野裕希	権利者 学校法人東京電機大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2018/6325	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>ナノエネルギー研究室 http://www.eee.dendai.ac.jp/eee/labo/sato/sato.html ナノエネルギー研究室 http://www.eee.dendai.ac.jp/eee/teacher/sato/sato.html</p>

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
連携研究者	深田 直樹 (FUKATA NAOKI) (90302207)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテク トニクス研究拠点・グループリーダー (82108)	