

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	シリコンインクを用いた低コスト量子ドット太陽電池の開発
研究機関・部局・職名	東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
氏名	野崎 智洋

【研究目的】

(1) 背景

InP、CdSe など、化合物半導体量子ドットを用いた次世代太陽電池の開発が大きく進展した。しかし、原材料の希少性や毒性など、社会受容性の観点から産業化が難航すると予想される。他方、太陽電池の基幹材料であるシリコンでも量子サイズ効果による多重励起子生成が確認されたことが契機となり、シリコン量子ドット太陽電池の開発が注目されている。しかし、シリコン量子ドットで多重励起子生成が可能になるのは 300nm 以下の紫外光を吸収した場合で、実質的な発電効率の向上ははまだ実現されていない。Green らは結晶サイズが異なるシリコン量子ドットを積層したオールシリコン・タンデムセルを考案し、変換効率 40% を達成できると提案している。しかし、結晶サイズが揃ったシリコン量子ドットを合成し、原子レベルで三次元配列させるためのプロセス技術はまだ開発されていない。

(2) 目的

次世代の高効率太陽電池を実現するためには、社会受容性（原材料の希少性や毒性）に配慮しつつ、太陽電池の効率向上と大幅なコスト削減を同時に達成しなければならない。本提案では、次世代高効率太陽電池に不可欠となる、サイズの揃ったシリコン量子ドット（以下 SiQD）を大量合成するための新規なプラズマ CVD 法を開発する。さらに、SiQD を有機溶媒に均一に分散させたシリコンインクを開発し、印刷技術で高効率太陽電池を低コストで製造するための基盤技術を確立する。これにより、旧来の高真空ドライプロセスでは対応できない量産性、コストダウン、自由度の高い太陽電池開発を可能とし、発電効率 40% を実現するシリコン量子ドット太陽電池のプロトタイプを開発する。このために以下の課題に取り組む。

①製造コストの大幅削減：革新的プラズマプロセスの開発

安価な四塩化ケイ素 (SiCl_4) を原料として用い、シリコン量子ドットを気相で連続合成する革新的プラズマ CVD 法を開発する。本提案では、シリコン量子ドットのサイズ分布制御と生産性向上の観点からプロセスの高度化を図る。

②シリコンインクの開発

表面を安定化（パッシベーション）させたシリコン量子ドットのコロイド溶液、すなわちシリコンインクを開発し、自己組織化等を利用して積層・薄膜化するプロセスを開発する。高温熱処理や高真空プロセスを必要とせず、印刷技術を用いてシリコン量

子ドットを薄膜化できるため、製造コストの革新的な低減において必須の技術となる。

③光吸収波長の選択

Green によって提案されたオールシリコン・タンデムセルの実現可能性を検証するために、平均結晶サイズが異なる（10nm 以下）の SiQD を合成し、分光吸収特性を定量的に評価する。さらに、SiQD 薄膜を用いたショットキーバリア太陽電池を開発し、SiQD のサイズなどによって光吸収波長を紫外から近赤外の間でチューニングできることを検証する。

④シリコン量子ドット太陽電池の開発

オールシリコン・タンデムセルの開発及び検証と並行して、SiQD 太陽電池に必要な新しいアーキテクチャーを検証する。具体的には、SiQD をアクセプターとして用いる有機無機ハイブリッドチア用電池を開発する。

【総合評価】

<input type="checkbox"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="checkbox"/>	優れた成果が得られている
<input type="checkbox"/>	一定の成果が得られている
<input type="radio"/>	十分な成果が得られていない

【所見】

① 総合所見

申請時に掲げた、発電効率 40%は夢のような効率で、達成されれば大きなインパクトであると期待され、本申請は採択された。目標は 20 年後と言え、現状の隔たりがあまりにも大きい。すなわち、オールシリコン・タンデムセルの基本構成要素となるショットキーバリア太陽電池を開発したが発電効率は 1%以下に留まった。一連の結果に基づき、SiQD (6 nm) と p-型半導体ポリマーをブレンドしたハイブリッド太陽電池を開発し、変換効率 3.6%を達成したにとどまっている。このような成果に基づき、次のような変換効率 30%到達への道筋を述べている。SiQD のドーピングおよびバルクヘテロジジャンクション構造の最適化により開放電圧をさらに向上できる可能性があり、変換効率として 10%が期待できる。さらに、単セルで 40%ではなくタンデム化によって総合的な変換効率の向上を狙うために、例えば、一般的なシリコン太陽電池のトップセルとしてシリコン量子ドット太陽電池を用いるタンデム化で、発電効率 30%が見込まれる。これらは、夢であって 30 ないし 40%の変換効率が達成できるということの証左ではない。

本研究では、学術的に有用な知見が種々得られている点があったと思われるが、本プロジェクトの目的は実際に高効率の太陽電池を実現することであり、その意味で、十分な成果は得られなかったと判断する。

② 目的の達成状況

・所期の目的が

(全て達成された ・ 一部達成された ・ 達成されなかった)

有機無機ハイブリッド太陽電池の実現によりプロジェクト終了時点でシリコン量子ドット太陽電池では最も高い変換効率である発電効率 3.6%を得ているが、最終目標の 40%との開きはあまりにも大きい。最適化によりまず 10%の効率を目指し、さらに、単セルでタンデム化によって例えば、一般的なシリコン太陽電池のトップセルとしてシリコン量子ドット太陽電池を用いるタンデム化で総合的な変換効率の向上を狙い 30%の変換効率を達成が見込まれるとして、変換効率達成の方向性を示している。これはプロトタイプを目指す研究とはいえ、目的の達成には程遠いと考えられる。

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が

(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が

(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

シリコン量子ドットを大量合成することに成功しているほか、シリコン量子ドットは可視領域では結晶サイズに応じた光吸収波長のチューニングが難しいこと、ならびにシリコン量子ドットだけを用いた単接合セルではキャリア輸送が著しく制限され、重金属系の量子ドットとは発電メカニズムが異なることを明らかにしている。しかし、研究開発目標とした発電効率 40%以上の達成が困難な状況を考えると現状では先進性・優位性があるとは言えない。

新たな知見の SiQD は可視領域で光を殆ど吸収しないことやシリコン系と重金属系の量子ドットでは、発電のメカニズムが異なることを得たのは、成果と言えるが、ここでの結果を乗り越え、目的とする高い発電効率を得るために必要な成果を得るまでには至っていない。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が (見込まれる ・ 見込まれない)

新発見により、今後得られる成果が飛躍的なものを期待したいが、本研究の成果が最終的に低コストで高効率の太陽電池開発につながっていないと考えられ、この点の貢献はなかったと言わざるを得ない。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが（行われた ・ 行われなかった）

それなりのマネジメントはされており、また指摘事項にも対応しようと努力している点は見えるが、しかし、成果は不十分な状況である。太陽光電池の実用化という観点から、これからでも現状の技術に詳しい技術者にアドバイザーに研究グループへの参加を得て、本研究成果が実用化に結びつく道筋を考えているが、研究の成果に対する見通しが甘かったと言わざるを得ない。

雑誌論文9件（掲載済み（査読有り）：8件、掲載済み（査読無し）：0件、未掲載：1件、会議発表：53件（専門家向け：46件、一般向け：7件）の発表があり研究の成果発表は行われている、また、一般国民については別途アウトリーチを実施している。主に、国内の技術者や理工系学生に対しては、学会が主催する講習会などで初学者向けにプレゼンテーションを行うなどの工夫をしている。成果の公表、国民との科学技術対話は適切に実施されている。