

課題番号	GR093
------	-------

**先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム)
実施状況報告書(平成 25 年度)**

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	機能性シリコンナノ複合材料を利用した次世代高効率太陽電池の開発
研究機関・ 部局・職名	独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点ナノマテリアル分野無機ナノ構造ユニット半導体ナノ構造物質グループ ・グループリーダー
氏名	深田 直樹

1. 当該年度の研究目的

最終年度は、変換効率の更なる向上を達成するために、変換効率の低下要因となる表面及び界面欠陥によるキャリアの再結合の抑制について検討する。表面・界面の再結合中心のパッシベーションとしては、オゾン処理法を新たに適用する。また、太陽光の利用効率を改善するために Si ナノ結晶を利用し、Si ナノ結晶と Si ナノワイヤからなる機能性複合膜を利用した新規太陽電池の可能性を探る。Si ナノワイヤの形成には、無電解エッチング法およびナノインプリントを利用した方法で行う。以上の構造最適化を行うことで、Si ナノワイヤ太陽電池の特性を最大限に引き出させるようにする。3 インチ Si ウェハ全面への Si ナノワイヤの成長を行い、新規太陽電池の大面积化の可能性についても検討する。

2. 研究の実施状況

無電解エッチング法による Si ナノワイヤの形成プロセスとその後の CVD によるシェル形成 (pn 接合形成) を最適化することで変換効率を前年度の 3.4% から 6.1% まで向上させることができた。これは、ナノワイヤの構造最適化による表面での光反射低減、キャリア再結合低減、シェル層の結晶性の改善、及び電極形成条件を改善できたことによる。この太陽電池セルの表面改質のためにオゾン処理を新たに行った結果、変換効率を更に 8.4% まで向上させることに成功した。更に、太陽光の利用効率を改善するためにナノワイヤ上面に Si ナノ結晶の添加を行った。その結果、変換効率を 12.9% まで向上させることに成功した。この値は、Si ナノワイヤを利用した太陽電池の変換効率としては最も高い値である。既設の CVD 装置のリアクターチャンバ内に、ナノワイヤの原料ガスおよびドーパントガスを分子流の状態ですべての 3 インチウェハ全体に均一に当てることができるエアシャワー機構を導入した結果、3 インチ Si ウェハ全面への Si ナノワイヤの成長を達成でき、3 インチサイズのセルを形成できた。この場合の現状の変換効率は 4-5% である。以上の研究成果に加えて、結晶構造制御に関する興味深い成果も得られた。一般的に Si 結晶の構造は cubic であるが、ドーピング濃度を制御した条件下では、Hexagonal の構造に変化できることを初めて発見した。この Hexagonal 構造では、バンドギャップが通常の間接遷移から直接遷移型になり、その大きさも通常の約 1.1eV から約 1.4-1.5eV へ増大する。Hexagonal 構造は Si 太陽電池材料としてより適した構造であり、本成果は Si 太陽電池の新たな可能性を期待できるものである。

3. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 8 件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 7 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. K. Sato, M. Dutta, and N. Fukata, "Inorganic/organic hybrid solar cells: Optimal carrier transport in vertically-aligned silicon nanowire arrays", <i>Nano Scale</i> 6, 6092–6101 (2014). DOI: 10.1039/c4nr00733f 2. N. Fukata, "Doping and characterization of impurity atoms in Si and Ge nanowires", <i>phys. status solidi C11</i> (2), 320–330 (2014). 10.1002/pssc.201300106, Invited Featured Article 3. F.Fabbri, E. Rotunno, L. Lazzarini, N. Fukata, and G. Salviati, "Visible and infrared Light Emission in Boron Doped Wurtzite Silicon Nanowires" <i>Scientific Report</i> 4, 1–7 (2014). DOI: 10.1038/srep03603 4. F.Fabbri, E. Rotunno, L. Lazzarini, D. Cavalcoli, A. Castaldini, N. Fukata, K. Sato, G. Salviati, and A. Cavallini, "Preparing the Way for Doping Wurtzite Silicon Nanowires while Retaining the Phase" <i>Nano Lett.</i> 13 5900–5906 (2013). DOI: 10.1021/nl4028445 5. N. Fukata, J. Kaminaga, R. Takiguchi, R. Rurali, M. Dutta, and K. Murakami, "Interaction of Boron and Phosphorus Impurities in Silicon Nanowires during Low-Temperature Ozone Oxidation", <i>J. Phys. Chem. C</i> 117 (39), 20300–20307 (2013). DOI: 10.1021/jp406713p 6. M. Dutta, L. Thirugnanam, K. Sato, and N. Fukata, "Diameter-controlled growth and impurity doping of silver colloid-seeded silicon microwires to nanowires for the realization of solar cell materials" <i>Mater. Exp.</i> 3, 1–7 (2013). DOI:10.1166/mex.2013.1097 7. X. Zhang and N. Fukata, "Fabrication of Holey Silicon Structures with Inner Radial p-n Junction for Solar Cells", <i>Solid. State. Comm.</i> 156, 76–79 (2013), DOI: 10.1016/j.ssc.2012.11.011 <p>(掲載済み一査読無し) 計 0 件</p> <p>(未掲載) 計 1 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. M. Dutta and N. Fukata, "A study on the effect of shell growth and doping conditions of core-shell homojunction Si nanowire solar cells", <i>J. Nanosci. Nanotech.</i> (in press).
<p>会議発表 計 16 件</p>	<p>専門家向け 計 15 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Naoki Fukata, Doping and characterization of impurity atoms in Si and Ge nanowires, E-MRS 2013 SPRING MEETING, 2013/5/28–5/31 (5/30), Strasburg (France) Invited 2. Naoki Fukata, Doping and characterization of impurity atoms in Si and Ge nanowires, CECAM Workshop Theory, Simulation and Modeling of SiGe Nanostructures: from Nanoelectronics to Renewable Energy, 2013/6/3–6/6 (6/6), Lausanne (Switzerland) Invited, 3. N. Fukata, J. Kaminaga, T. Sekiguchi, S. Hishita and K. Murakami, Recrystallization and reactivation of dopant atoms in ion-implanted silicon nanowires, ICDS27, 2013/7/22–7/26, Bologna (Italy) 4. N. Fukata, M. Mitome, T. Sekiguchi, Y. Bando, M. Kirkham, Jung-il Hong, Zhong Lin Wang and R. Snyder, Characterization of selective doping and stress in Si/Ge and Ge/Si core-shell nanowires, Nanowire2013, 2013/11/12–11/15 (11/12), Tel-Aviv (Israel) 5. N. Fukata, M. Mitome, T. Sekiguchi, Y. Bando, M. Kirkham, Jung-il Hong, Zhong Lin Wang and R. Snyder, Characterization of site selective doping and stress in Si/Ge and Ge/Si core-shell nanowires, TNT Japan, 2014/1/29–1/31 (1/30), Tokyo (Japan) 6. 神永惇, 滝口亮, 鈴木慶太郎, 菱田俊一, 関口隆史, 村上浩一, 深田直樹, B および P を同時ドーピングした SiNWs の熱酸化過程での不純物の偏析挙動, 秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 2013/9/19 (9/16–9/20), 同志社大学, Poster award 受賞 7. 北澤駿, 佐藤慶介, 深田直樹, 平栗健二, 高輝度、長寿命シリコンナノ粒子の作製プロセスの開発, 秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 2013/9/19 (9/16–9/20), 同志社大学 8. Fuwei Zhuge, Takeshi Yanagida, Kazuki Nagashima, Naoki Fukata, Masaki Kanai, Gang Meng, Yong He, Tomoji Kawai, Thermopower Factor Measurement of Single Nanowires: On the Diameter Modulation to the Seebeck Coefficient and Electrical Conductivity, 秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 2013/9/19 (9/16–9/20), 同志社大学 9. 和田賢二, 王銳, 鈴木利一, Russell S. Deacon, 深田直樹, 石橋幸治, Ge/Si core/shell ナノワイヤ量子ドットの形成, 秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 2013/9/19 (9/16–9/20), 同志社大学 10. 深田直樹, 機能性シリコンナノ複合材料を利用した次世代高効率太陽電池の開発, First シンポジウム「科学技術が拓く 2030 年」へのシナリオ, 2014/3/1 (2/28–3/1), ベルサール新宿グランド

様式19 別紙1

	<p>11. 山野邊奎耶, 鈴木涼子, 佐藤慶介, 深田直樹, 平栗健二, シリコンナノ粒子の光起電力特性, 春季第 61 回応用物理学関係連合講演会, 2014/3/18(3/17-3/20), 青山学院大学</p> <p>12. FuweiZhuge, 柳田剛, 深田直樹, 内田健, 金井真樹, 長島一樹, GangMeng, HeYong, SakonRahong, 川合知二, Enhancement of Thermoelectric Properties via Radial Dopant Distribution in Boron-doped Silicon Nanowires, 2014/3/19(3/17-3/20), 青山学院大学</p> <p>13. 余銘珂, 神永惇, 深田直樹, Ge/Si コア/シェル ナノワイヤ ヘテロ構造の成長と評価, 2014/3/19(3/17-3/20), 青山学院大学</p> <p>14. 佐藤慶介, Dutta Mrinal, 深田直樹, シリコンナノワイヤ/ポリマー複合太陽電池のセル性能 –ナノワイヤ長・アニール温度の効果–, 2014/3/19(3/17-3/20), 青山学院大学</p> <p>15. Dutta Mrinal, 深田直樹, Core-shell homojunction Si nanowire solar cells: Effect of shell growth and doping conditions on their photovoltaic properties, 2014/3/19(3/17-3/20), 青山学院大学</p> <p>一般向け 計 1 件</p> <p>1. 深田直樹, 半導体ナノ構造の機能化による新奇デバイス応用への挑戦, 第 10 回つくばサイエンス・アカデミー賛助会, 2013/11/27, つくば国際会議場, Invited</p>
<p>図 書</p> <p>計 1 件</p>	<p>1. 深田直樹, 「ナノワイヤ最新技術の基礎と応用展開」の第 2 編第 2 章ドーピングを執筆担当, シーエムシー出版, pp127-136, 全ページ 241, 2013 年</p>
<p>産業財産権 出願・取得状 況</p> <p>計 0 件</p>	<p>(取得済み) 計 0 件</p> <p>(出願中) 計 0 件</p>
<p>Webページ (URL)</p>	<p>1. 機能性シリコンナノ複合材料を利用した次世代高効率太陽電池の開発 http://nfukata.org/index.php</p> <p>2. Convergence, A Global Network and a Little Tension Get Good Results http://www.nims.go.jp/mana/pror/periodical/n28red0000003whw-att/ConvergenceNo14_E.pdf</p>
<p>国民との科 学・技術対話 の実施状況</p>	<p>1. 次世代半導体ナノ構造太陽電池, 2013/4/18, NIMS 所内, 一般市民, 100 名, NIMS 一般公開</p> <p>2. 次世代太陽電池, 2013/8/22, 兵庫県立神戸高等学校 50 名, 太陽電池に関する高校生向けの講義</p> <p>3. 半導体ナノ構造を利用した太陽電池の高効率化への挑戦, 2013/11/7, 山形県立山形南高等学校, 60 名, 太陽電池に関する高校生向けの講義</p>
<p>新聞・一般雑 誌等掲載</p> <p>計 0 件</p>	
<p>その他</p>	

4. その他特記事項

平成 25 年 4 月 1 日 物質・材料研究機構理事長賞

実施状況報告書(平成25年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されません

1. 助成金の受領状況(累計)

(単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の 累計)	③当該年度受 領額	④(=①-②- ③)未受領額	既返還額(前 年度迄の累 計)
直接経費	87,000,000	64,970,000	22,030,000	0	0
間接経費	26,100,000	19,491,000	6,609,000	0	0
合計	113,100,000	84,461,000	28,639,000	0	0

2. 当該年度の収支状況

(単位:円)

	①前年度未執 行額	②当該年度受 領額	③当該年度受 取利息等額 (未収利息を除 く)	④(=①+②+ ③)当該年度 合計収入	⑤当該年度執 行額	⑥(=④-⑤) 当該年度未執 行額	当該年度返還 額
直接経費	3,971,742	22,030,000	0	26,001,742	25,946,201	55,541	0
間接経費	0	6,609,000	0	6,609,000	6,609,000	0	0
合計	3,971,742	28,639,000	0	32,610,742	32,555,201	55,541	0

3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	14,943,349	紫外可視近赤外分光光度計、液体ヘリウム等
旅費	1,073,517	研究成果発表旅費(E-MRS 2013 Spring Meeting参加)等
謝金・人件費等	8,077,351	人件費(研究業務員、ポスドク研究員)
その他	1,851,984	学会参加費、英文校閲等
直接経費計	25,946,201	
間接経費計	6,609,000	
合計	32,555,201	

4. 当該年度の主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能 等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関 名
半導体ナノ構造電 気的特性評価装置	2450型ソースメー タ、トライアクチャ ルケーブル 3m 7078-TRX-10	1	684,180	684,180	2013/11/29	(独)物質・材料研 究機構
紫外可視近赤外分 光光度計・積分球 ユニット	V-670DS・ISN- 723	1	2,982,000	2,982,000	2014/1/22	(独)物質・材料研 究機構
化学気相堆積装置 用緊急除害装置	WGR-30B-1	1	5,614,875	5,614,875	2014/1/28	(独)物質・材料研 究機構