

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) 実績報告書

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. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

2. 収支の状況

(単位:円)

	交付決定額	交付を受けた額	利息等収入額	収入額合計	執行額	未執行額	既返還額
直接経費	87,000,000	87,000,000	0	87,000,000	86,944,459	55,541	0
間接経費	26,100,000	26,100,000	0	26,100,000	26,100,000	0	0
合計	113,100,000	113,100,000	0	113,100,000	113,044,459	55,541	0

3. 執行額内訳

(単位:円)

費目	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	合計
物品費	149,625	31,704,367	5,403,214	14,943,349	52,200,555
旅費	0	426,235	702,487	1,073,517	2,202,239
謝金・人件費等	0	5,846,295	16,223,207	8,077,351	30,146,853
その他	0	361,214	181,614	1,851,984	2,394,812
直接経費計	149,625	38,338,111	22,510,522	25,946,201	86,944,459
間接経費計	45,000	12,123,000	7,323,000	6,609,000	26,100,000
合計	194,625	50,461,111	29,833,522	32,555,201	113,044,459

4. 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
雰囲気可変型赤外線ランプ加熱装置	赤外線放射面反射集光式、10°C/sec	1	5,250,000	5,250,000	2011/8/26	(独)物質・材料研究機構
半導体ナノ構造製造装置	マグネトロンスパッタ・6インチ対応	1	16,821,000	16,821,000	2011/9/1	(独)物質・材料研究機構
ドライポンプ部品(消耗品)	アイシン精機 DB-010C-P モジュール	1	1,218,000	1,218,000	2011/9/15	(独)物質・材料研究機構
電池充放電システム	8チャンネル、5電流レンジ	1	1,861,650	1,861,650	2012/3/13	(独)物質・材料研究機構
不活性ガス雰囲気下Liイオン用セル組立システム	露点-66°C及び酸素濃度1 ppm以下	1	4,331,250	4,331,250	2012/3/13	(独)物質・材料研究機構
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-	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

5. 研究成果の概要

Siナノワイヤの内部動径方向にpn接合を有する特殊なコアシェル構造を構築した新規太陽電池材料および太陽電池セルの開発を行った。ナノワイヤの形成法として、化学気相堆積(CVD)法、無電解エッチング法、ナノインプリント法の3種類の方法を確立した。ナノワイヤ構造および位置制御ドーピングを利用したpn接合形成の最適化を行い、オゾン処理を利用した新しい表面再結合中心の低減、およびSiナノ結晶との複合機能化を利用することで、ナノワイヤを利用した太陽電池において12.9%という高い変換効率を達成できた。ナノ構造を利用した本太陽電池は、Si材料の削減と性能向上の両立を期待できるため、産業面での波及効果が高く、環境問題解決のためのクリーンエネルギーの開発といった面でも意義のある研究といえる。

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) 研究成果報告書

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名 (下段英語表記)	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
	Development of next-generation high efficiency solar cells using functionalized silicon nanostructures
研究機関・部局・ 職名 (下段英語表記)	独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテク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
	National Institute for Materials Science・International Center for Materials Nanoarchitectonics Nano-Materials Field Inorganic Nanostructures Unit Nanostructured Semiconducting Materials ・Group Leader
氏名 (下段英語表記)	深田 直樹
	Naoki Fukata

研究成果の概要

(和文): Si ナノワイヤの内部動径方向に pn 接合を有する特殊なコアシェル構造を構築した新規太陽電池材料および太陽電池セルの開発を行った。ナノワイヤの形成法として、化学気相堆積法(CVD)法、無電解エッチング法、ナノインプリント法の3種類の方法を確立した。ナノワイヤ構造および位置制御ドーピングを利用した pn 接合形成の最適化を行い、オゾン処理を利用した新しい表面再結合中心の低減、および Si ナノ結晶との複合機能化を利用することで、ナノワイヤを利用した太陽電池において 12.9%という高い変換効率を達成できた。

(英文): Development of new solar cell materials and cell structures were done by constructing core-shell nanowire structures with radial pn junction inside of silicon nanowires. The nanowire structures were fabricated by chemical vapor deposition (CVD), electroless etching, and nanoimprint methods. The highest energy conversion efficiency of 12.9% was obtained by optimizing the structures and pn junction due to selective doping, reducing the recombination centers on silicon nanowire surface by ozone treatments, and constructing hybrid structures with Si nanocrystals.

様式21

1. 執行金額 113,044,459 円
(うち、直接経費 86,944,459 円、間接経費 26,100,000 円)

2. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

3. 研究目的

本研究では、シリコンナノ構造体を機能的に複合化した安価で環境負荷の小さい高効率太陽電池材料を開発し、次世代の太陽電池開発へと繋げる。本研究では、次世代の太陽電池材料として、1) Si ナノワイヤの内部に pn 接合を形成した新規太陽電池材料の開発、2) 成長軸方向にテーパ構造を有する Si ナノワイヤを利用した新規太陽電池材料の開発、3) Si ナノワイヤおよび Si ナノ結晶の両材料を機能的に複合化した新規太陽電池材料、4) Si ナノワイヤと導電性有機ポリマーからなるハイブリッド太陽電池セルのための新規材料の開発、および5) ナノワイヤとは逆の構造となるマイクロホールを利用した新規材料の開発を目指す。以上の新規材料を開発し、Si 材料の削減による低コスト化および変換効率の向上を両立した、これまでに無い新しい次世代シリコン太陽電池実用における基礎・基盤技術を確立する。

4. 研究計画・方法

上述の研究目的を達成するために、以下の研究計画・方法にて研究を行った。

<平成22年度>: H22年度は、Si ナノワイヤおよびマイクロホールの成長制御技術の確立を行う。Si ナノワイヤの成長は、表面・界面制御に優れた高真空 CVD 装置を用いて行い、成長温度、ガス圧、ガス流量、成長基板および触媒の影響について詳細に調べる。不純物ドーピングに関しては、成長時にジボラン及びホスフィンガスを添加することで行う。ナノワイヤの結晶性に関しては、ラマン分光及び電子スピン共鳴法により調べる。Si マイクロホールの形成に関しては、Si 基板上にフォトリソグラフィを利用してパターンニングした銀ナノドットを触媒として利用し、最適なエッチング条件を導き出す。

<平成23年度>: Si ナノワイヤの作製法として、無電解エッチングによる方法及びナノインプリントによる手法を新たに行う。前者ではウェットエッチングにより、後者はドライエッチングによりナノワイヤ構造を形成する。エッチングによりナノワイヤを形成する場合、表面へのダメージの影響が問題になる。そこで、ナノワイヤ表面の詳細な構造観察を行い、表面ダメージ層の除去及び欠陥のパッシベーションに関して調べる。以上のナノワイヤに加えて、Si ナノ結晶の大量生産を可能にするためのスパッタ装置を導入し、生成条件を確立する。Si ナノ結晶と Si ナノワイヤからなる機能性複合膜の形成実験も開始する。

<平成24年度>: Si ナノ構造体を用いた新規太陽電池材料として、pn 接合をナノワイヤ内の動径方向に形成したコアシェルタイプの材料で行う。良好な pn 接合の形成には、コア及びシェル層の結晶性とそれぞれの層への位置制御ドーピング技術が重要となる。コア及びシェル層の結晶性、位置制御ドーピングの評価には、透過電子顕微鏡、ラマン分光、電子スピン共鳴及び XRD

測定により詳細に調べる。最終的には、作製された新規材料を用いて太陽電池セルを作製し、変換効率等の太陽電池特性を評価する。

<平成 25 年度>：変換効率向上のための表面・界面欠陥の除去、軽減を目的とした、ナノワイヤ表面のパッシベーション技術に関して研究を行う。最終的には、3 インチ Si ウェハ全面への Si ナノワイヤの成長/形成を行い、新規太陽電池の大面积化を実施する。

5. 研究成果・波及効果：ページ数制限のため、ナノワイヤ関連の主要成果のみ下記に報告する

(1)ナノワイヤの形成とナノワイヤ内部動径方向への pn 接合の形成

①CVD 法

金属触媒を利用した Vapor-Liquid-Solid(VLS)成長を利用することで、直径 5-100nm の範囲でのサイズ制御と窒素ガス添加による圧力制御をうまく活用することで 1-3 $\mu\text{m}/\text{min}$ の高速成長を実現することができた。Si ナノワイヤの内部に pn 接合を形成する技術として、位置制御ドーピングを利用した n-Si/p-Si 及び p-Si/n-Si コアシェルナノワイヤの形成技術を確立できた(図 1)。Si ナノワイヤ内部への pn 接合の形成に関しては、I-V 測定により確認できている。また、ラマン散乱及び電子スピン共鳴法の高感度化により、Si ナノワイヤ内部の B および P 不純物の結合・電子状態も実験的に明らかにできており、コア/シェルそれぞれへの位置制御ドーピングに成功していることも実験的に証明できた(図 2)。

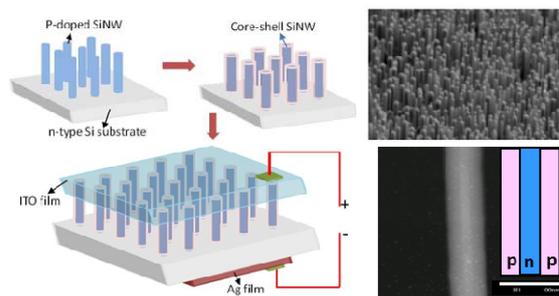


図1. Si系ナノワイヤを利用した太陽電池セルの概念図とCVDにより成長したSiナノワイヤのSEMおよびTEM像。

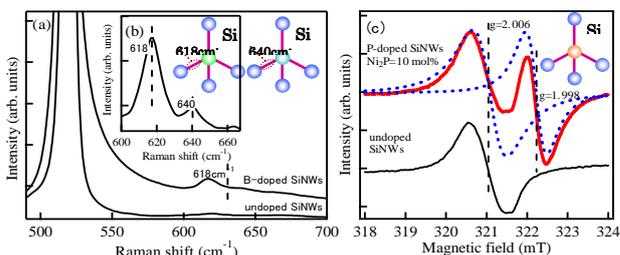


図2. (a) Bドーピングおよび未ドーピング Si ナノワイヤのラマンスペクトルと (b) 拡大図. (c) Pドーピングおよび未ドーピング Si ナノワイヤの ESR シグナル.

②無電解エッチング法

硝酸銀 (AgNO_3) およびフッ酸 (HF) の混合溶液を利用したエッチングを行うことで、p 型および n 型 Si 基板上にナノワイヤ構造を形成できた(図 3)。ナノワイヤの直径に関しては、混合溶液中の AgNO_3 の濃度を変えることで制御できた。

また、ナノワイヤ形成後、HF エッチングにより表面の酸化膜を完全に除去後、シェル層を CVD で形成することで pn 接合形成を行った。

③ナノインプリント法

ナノインプリント用のモールドを作製し、図 4 に示すような規則的なナノ構造アレイの作製に成功した。

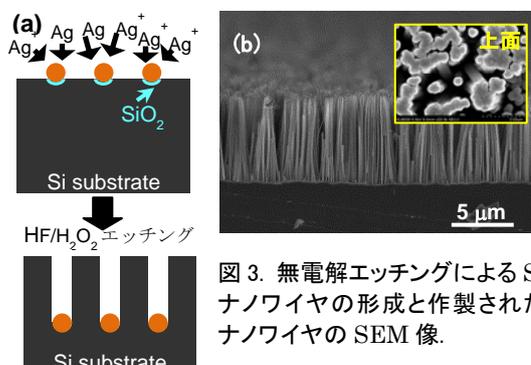


図3. 無電解エッチングによる Si ナノワイヤの形成と作製されたナノワイヤの SEM 像。

特徴としては完全にメタルフリーで作製できる点にある。また、無電解エッチングで作製したナノワイヤと同様に、HF エッチングにより表面の酸化膜を完全に除去後、シェル層を CVD で形成し、セル作製・評価を行った。

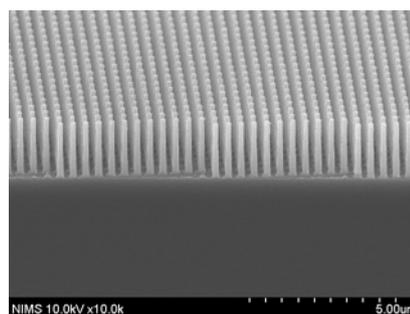


図 4. ナノインプリントとエッチングで作製された Si ナノワイヤの SEM 像。

(2) 太陽電池セルの形成と特性評価

①表面/界面処理なし

コアシェルナノワイヤ構造に対して電極形成をし、太陽電池セルの形成を行った。ナノワイヤ表面への電極形成はスパッタリング法で行った。まずは、無電解エッチングで形成した n 型 Si ナノワイヤの形状(長さ)を最適化するために、n 型 Si ナノワイヤと p 型導電性ポリマーである PEDOT:PSS とのコアシェル構造により pn 接合を形成し、ハイブリッド型太陽電池セルを作製した。その結果、長さ 0.57 μm の場合に、短絡電流 30.7mA/cm²、開放電圧 0.47V、曲線因子 0.65、変換効率 9.3%を得ている(図 5)。同様なハイブリッド型セルでの世界的な最大変換効率は約 12%である。

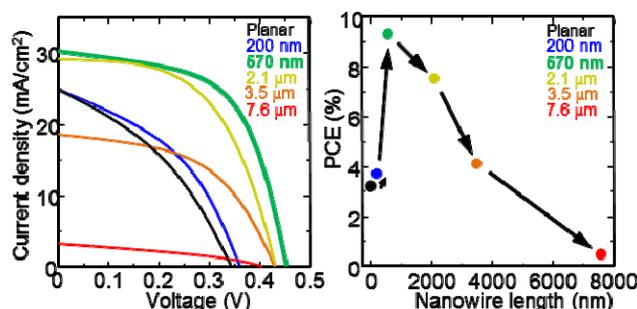


図 5. n 型 Si ナノワイヤ/p 型ポリマーハイブリッド太陽電池特性(ナノワイヤの長さ依存性)。

次に、無電解エッチングで形成した最適長さ 0.57 μm の n 型 Si ナノワイヤに対して、CVD で p 型シェル層を形成し、Si のみからなる太陽電池セルの作製を行った。その結果、最も良い特性として、短絡電流 20.86mA/cm²、開放電圧 0.46V、曲線因子 0.63、変換効率 6.1%を得ている(図 6)。セルの形成を最適化することで、中間報告時の 3.4%から大幅に変換効率を向上できた。一方、ナノインプリントで形成した Si ナノワイヤ太陽電池セルに関しては、短絡電流 23.7mA/cm²、開放電圧 0.48V、曲線因子 0.42、変換効率 4.8%を得ている。無電解エッチングの場合より変換効率が低くなる理由としては、ナノインプリント法で形成したナノワイヤの表面はどうしても荒れており、キャリアの再結合中心が多いためである。そこで、次に示すように表面処理を行った。

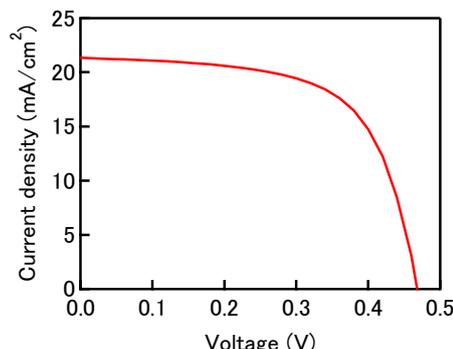


図 6. 無電解エッチングで作製した n コア/p シェル Si ナノワイヤ太陽電池の I-V 特性。

②オゾン処理を利用した表面処理

本研究では、オゾン処理という新しい表面パッシベーション技術を表面欠陥準位の低減のために用いた。オゾン処理は、超高真空装置に真空紫外ランプ(波長 172nm、パワー密度 17 mW/cm²)を取り付けて、酸素ガスをオゾン化することで行った。処理温度は 200℃と 300℃で

行った。特徴としては、オゾンを利用することで低温化が可能となり、必要以上の酸化を抑制することで、表面酸化膜との間に残存するダングリングボンド欠陥の密度を効果的に低減させることにある。図7に示すように、オゾン処理前に6.1%であった変換効率がオゾン処理 200°C 15 分後に6.5%、300°C 20 分後に 8.4%まで増大させることに成功し、オゾン処理の有効性を示すことができた。

③Si ナノ結晶との複合機能化

Si ナノ結晶(直径 2-5nm)との複合機能化に関しては、Si ナノワイヤのみを用いた場合よりも構造が複雑になり、より制御が困難になるということから研究の途中段階で研究計画の再考が提案された。一度は Si ナノ結晶との複合機能化に関しては計画をストップしたが、最終年度に再挑戦を行った結果、優れた特性を得ることができた。Si ナノ結晶は Si ナノワイヤ表面、特に上部をコーティングするように分散した。結果は、図7のオゾン処理効果の I-V 測定データのとともに示す。オゾン処理では、最大で 8.4%までの変換効率増大であったのが、Si ナノ結晶との複合化とオゾン処理を利用することで、変換効率を最大で 12.9%まで増大させることに成功した(短絡電流 38.7mA/cm²、開放電圧 0.47V、曲線因子 0.71)。この変換効率に関しては、私の知る限りこれまで報告されているナノワイヤ(アスペクト比 10 以上)を利用した太陽電池セルで最高の値である。高い変換効率を得られた主な理由としては、ナノ結晶を利用することにより、短波長側の太陽光の利用効率が向上したことにある。また、電極形成技術の改善も1つの理由である。

(4) Si 結晶構造の新しい制御法

以上の成果に加えて、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 構造へ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、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。

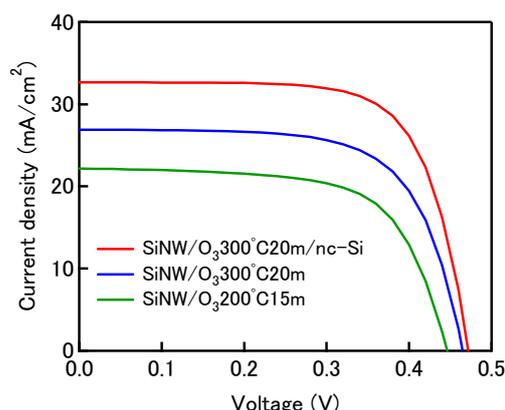


図7. 無電解エッチングで作製した n コア/p シェル Si ナノワイヤ太陽電池の I-V 特性へのオゾン処理および Si ナノ結晶複合機能化による効果。

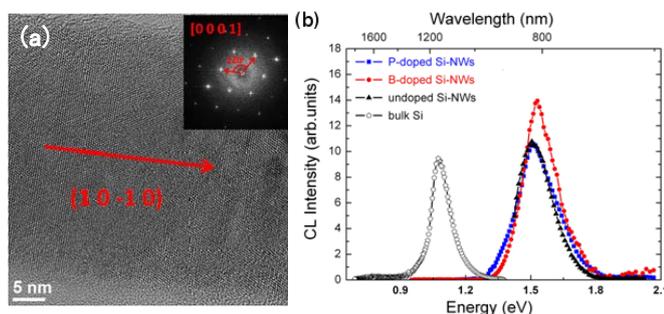


図8. (a) Hexagonal 構造を有する Si ナノワイヤの TEM 像. (b) Hexagonal 構造を有する Si ナノワイヤおよび cubic 構造であるバルク Si のカソードルミネッセンス測定結果。

6. 研究発表等

雑誌論文	(掲載済み一査読有り) 計 18 件
計 19 件	<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 8. K. Sato, A. Castaldini, N. Fukata, and A. Cavallini, "Electronic Level Scheme in Boron- and Phosphorus-Doped Silicon Nanowires", <i>Nano Lett.</i> 12 (6), 3012-3017, (2012). 9. N. Fukata, M. Mitome, T. Sekiguchi, Y. Bando, M. Kirkham, J-I. Hong, Z. L. Wang, and R. L. Snyder, "Characterization of Impurity Doping and Stress in Si/Ge and Ge/Si Core-Shell Nanowires", <i>ACS NANO</i> 6(10), 8887-8895 (2012) 10. J. Tarun, S. Huang, Y. Fukuma, H. Idzuchi, Y. Otani, N. Fukata, K. Ishibashi, and S. Oda, "Temperature Evolution of Spin-Polarized Electron Tunneling in Silicon Nanowire-Permalloy Lateral Spin Valve System", <i>Appl. Phys. Exp.</i> 5 (4), 045001-1-045001-3 (2012). DOI: 10.1143/APEX.5.045001. 11. Dai-Ming Tang, Cui-Lan Ren, Ming-Sheng Wang, Xianlong Wei, Naoyuki Kawamoto, Chang Liu, Yoshio Bando, Masanori Mitome, Naoki Fukata, and Dmitri Golberg, "Mechanical Properties of Si Nanowires as Revealed by in Situ Transmission Electron Microscopy and Molecular Dynamics Simulations", <i>Nano Lett.</i> 12, 1898-1904, (2012). 12. Sung-Kwon Shin, Shaoyun Huang, Naoki Fukata, and Koji Ishibashi, "Top-gated germanium nanowire quantum dots in a few-electron regime", <i>Appl. Phys. Lett.</i> 100, 073103 (4pages), (2012), DOI: 10.1063/1.3684941 13. N. Fukata, R. Takiguchi, S. Ishida, S. Yokono, S. Hishita, and K. Murakami, "Recrystallization and Reactivation of Dopant Atoms in Ion-Implanted Silicon Nanowires", <i>ACS NANO</i> 6(4), 3278-3283, (2012). 14. X. Zhang, D. Golberg, Y. Bando, and N. Fukata, "n-ZnO/p-Si 3D heterojunction solar cells in Si holey arrays", <i>Nanoscale</i> 4, 737-741 (2012). 15. F. Fabbri, F. Rossi, G. Attolini, G. Salviati, B. Dierre, T. Sekiguchi, and N. Fukata, "Luminescence properties of Si/SiO₂ core-shell nanowires with different radial structure", <i>Materials Letters</i> 71(12), 137-140, (2011). 16. J. Tarun, S. Huang, Y. Fukuma, H. Idzuchi, Y. Otani, N. Fukata, K. Ishibashi, and S. Oda, "Demonstration of spin valve effects in silicon nanowires", <i>J. Appl. Phys.</i> 109(7), 07C508 (3 pages) (2011). DOI: 10.1063/1.3562904 17. K. Sato, S. Yokosuka, Y. Takigami, K. Hirakuri, K. Fujioka, Y. Manome, H. Sukegawa, H. Iwai, and N. Fukata, "Size-Tunable Silicon/Iron Oxide Hybrid Nanoparticles with Fluorescence, Superparamagnetism and Biocompatibility", <i>JACS</i> 133 (46), 18626-18633, (2011). 18. N. Fukata, S. Ishida, S. Yokono, R. Takiguchi, J. Chen, T. Sekiguchi, and K. Murakami, Segregation behaviors and radial distribution of dopant atoms in silicon nanowires, <i>Nano Lett.</i> 11, 651 (2011).

	<p>(掲載済み一査読無し) 計 0 件</p> <p>(未掲載) 計 1 件</p> <p>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", J. Nanosci. Nanotech. (in press).</p>
<p>会議発表 計 38 件</p>	<p>専門家向け 計 36 件</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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)</p> <p>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)</p> <p>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)</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <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. Fuwei Zhuge, 柳田剛, 深田直樹, 内田健, 金井真樹, 長島一樹, Gang Meng, He Yong, Sakon Rahong, 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>16. 深田直樹, 滝口亮, 石田慎哉, 横野茂輝, 関口隆史, 村上浩一, シリコンナノワイヤへの不純物ドーピングと不純物の挙動, 名古屋大学, 2012/6/21, シリコン材料・デバイス研究会(SDM), (招待)</p> <p>17. Naoki Fukata, Doping and characterization of impurity atoms in Si and Ge nanowires, ラフォーレ修善寺, 2012/7/11-2012/7/13, 第 31 回電子材料シンポジウム(EMS), (招待)</p> <p>18. 鈴木慶太郎, 横野茂輝, 神永惇, 深田直樹, 関口隆史, 菱田俊一, 村上浩一, Si+</p>

	<p>イオン注入による Si ナノワイヤ中への Si ナノ結晶形成・制御, 愛媛大学, 2012/9/11-2012/9/14, 秋季第 72 回応用物理学会学術講演会</p> <p>19. 神永 惇, 鈴木慶太郎, 深田直樹, 菱田俊一, 関口隆史, 村上浩一, Si ナノワイヤの結晶性回復と不純物の活性化, 愛媛大学, 2012/9/11-2012/9/14, 秋季第 72 回応用物理学会学術講演会</p> <p>20. Shun Ito, Kenji Hirakuri, Keisuke Sato and Naoki Fukata, Fabrication of nitrogen-doped silicon nanoparticles by reactive RF sputtering, Warsaw (Poland), 2012/9/17-2012/9/21, E-MRS 2012 FALL MEETING</p> <p>21. Naoki Fukata, Recrystallization and reactivation of dopant atoms in ion implanted silicon nanowires, Berlin (Germany), 2012/9/19-2012/9/21, Nanowires2012, (Invited).</p> <p>22 Naoki Fukata, Doping and characterization of impurity atoms in Si and Ge nanowires, Hanoi (Bietnam), 2012/10/29-2012/11/2, The 6th International Workshop on Advanced Materials Science, IWAMS2012, (Invited)</p> <p>23. 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, Boston (USA), 2012/11/26-2012/12/1, 2012 MRS FALL Meeting</p> <p>24. N. Fukata, Doping and characterization of impurity atoms in silicon and germanium nanowires, Lesbos (Greece), 2011/6/13-2011/6/17, Nanowire2011</p> <p>25. Naoki Fukata, Keisuke Sato, Masanori Mitome, Yoshio Bando, and Takashi Sekiguchi, Impurity doping in semiconductor nanowires, Nelson (New Zealand), 2011/7/18-2011/7/22, The 26th International Conference on Defects in Semiconductors</p> <p>26. 瀧上泰則, 佐藤慶介, 平栗健二, 深田直樹, 薄膜太陽電池用ボロンドープシリコンナノ粒子の構造評価, 山形大学, 2011/8/28-2011/9/2, 応用物理学会</p> <p>27. 滝口 亮, 石田慎哉, 横野茂輝, 鈴木慶太郎, 深田直樹, 菱田俊一, 陣君, 関口隆史, 村上浩一, Si ナノワイヤへのホットインプランテーションによる P ドーピング, 山形大学, 2011/8/28-2011/9/2, 応用物理学会</p> <p>28. 滝口 亮, 鈴木慶太郎, 深田直樹, 菱田俊一, 陣君, 関口隆史, 村上浩一, 低温オゾン酸化による SiNWs 中の B 偏析抑制効果, 山形大学, 2011/8/28-2011/9/2, 応用物理学会</p> <p>29. 鈴木慶太郎, 横野茂輝, 滝口 亮, 深田直樹, 菱田俊一, 関口隆史, 村上浩一, Si ナノワイヤ中の Si ナノ結晶に対する水素パッシベーション効果, 山形大学, 2011/8/28-2011/9/2, 応用物理学会</p> <p>30. N. Fukata, S. Ishida, S. Yokono, R. Takiguchi, T. Sekiguchi, and K. Murakami, Segregation behaviors and radial distribution of dopant atoms in silicon nanowires, Boston (USA), 2011/11/28-2011/12/2, 2011 MRS Fall Meeting</p> <p>31. N. Fukata, M. Mitome, Y. Bando, T. Sekiguchi, M. Kirkham, J.-il Hong, Z. L. Wang, and R.L. Snyder, Segregation behaviors and radial distribution of dopant atoms in silicon nanowires, Boston (USA), 2011/11/28-2011/12/2, 2011 MRS Fall Meeting</p> <p>32. N. Fukata, Doping and characterization of impurity atoms in Si and Ge nanowires, Hokkaido University, 2012/3/5-2012/3/6, 2012 RCIQE International Workshop for Green Electronics</p> <p>33. Xiaomei Zhang, Dimitri Gorberg, Yoshio Bando, Naoki Fukata, n-ZnO/p-Si heterojunction solar cells in Si holey arrays, Waseda University, 2012/3/15-2012/3/18, 応用物理学会</p> <p>34. 神永惇, 滝口亮, 鈴木慶太郎, 深田直樹, 菱田俊一, 陣君, 関口隆史, 村上浩一, シリコンナノワイヤ中の P ドナーの熱酸化過程での偏析挙動, 早稲田大学, 2012/3/15-2012/3/18, 応用物理学会</p> <p>35. 千把太, 深田直樹, 佐藤慶介, 平栗健二, ボロンドープシリコンナノ粒子の構造特性—ターゲット条件とアニール温度依存性—, 早稲田大学, 2012/3/15-2012/3/18, 応用物理学会</p> <p>36. N. Fukata, Doping and characterization of boron and phosphorus atoms in germanium nanowires, Tsukuba city, 2011/3/2-3/4, NIMS, MANA Symposium</p>
--	--

	<p>一般向け 計2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>2. 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, つくば国際会議場, 2013/1/22, SAT テクノロジー・ショーケース 2013</p>
図書 計1件	<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>
産業財産権 出願・取得状況 計1件	<p>(取得済み) 計0件</p> <p>(出願中) 計1件</p> <p>特願 2010-113778 深田直樹、佐藤慶介「シリコンナノ粒子/シリコンナノワイヤ複合材料、太陽電池、発光デバイス、及び製造法」平成22年5月18日出願</p>
Webページ (URL)	<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>
国民との科学・技術対話の実施状況	<p>1. 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>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. 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>4. 次世代半導体ナノ構造太陽電池, 2013/1/30-2013/2/1, 東京ビックサイト, 150名, 一般市民(企業の方中心), Nanotech2013</p> <p>5. 次世代半導体ナノ構造太陽電池, 2012/4/18, NIMS 所内, 一般市民, 120名, NIMS 一般公開</p> <p>6. 次世代半導体ナノ構造太陽電池, 東京ビックサイト, 2012/2/15-2012/2/17, 150名, Nanotech2012</p> <p>7. 次世代半導体ナノ構造太陽電池, NIMS 所内, 2011/6/30, 100名, NIMS 一般公開</p>
新聞・一般雑誌等掲載 計3件	<p>1. 日刊工業新聞, 2012年5月28日掲載, 『ナノワイヤ太陽電池』</p> <p>2. 鉄鋼新聞, 2012/1/27, Si ナノ構造の高速形成技術開発-高効率太陽電池を低コスト化-</p> <p>3. 日刊工業新聞 2011年2月7日, 『1/50000 mm の直径のシリコンナノワイヤ中で不純物の挙動を捕らえることに成功-次世代縦型トランジスタおよびナノワイヤ太陽電池材料の実現に向けて-』</p>
その他	<p>1. 日刊工業新聞社 J-NET21, 2012年12月7日から掲載, 第20回 大幅な性能向上の可能性を秘める太陽電池用シリコンナノワイヤ</p>

7. その他特記事項

- 1) 2014年4月1日 物質・材料研究機構理事長賞
- 2) 2013年1月22日 SAT テクノロジー・ショーケース「ベスト新分野開拓賞」(Best Presentation Award for Opening New Frontier)

様式21

3) 2012年5月9日 The 8th International Nanotechnology Conference (INC), Japan Nano Day
Best Poster Award 「Segregation behaviors and radial distribution of dopant atoms in silicon
nanowires」 (Tsukuba, Japan)