

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01335

研究課題名(和文)半導体ナノ細線の弾性歪み誘起電気伝導特性に対する表面電位の関与解明

研究課題名(英文)Effect of Surface Potential on Piezoresistivity for Semi-conductive Nanowires

研究代表者

磯野 吉正 (Isono, Yoshitada)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：20257819

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：表面電位がSiCナノワイヤ(NW)のピエゾ抵抗効果に及ぼす影響を明らかにするため、SiCNWをチャンネルとするFET型曲げ試験デバイスを作製し、曲げ歪み作用下でゲート電圧を変化させながら、SiCNWのゲージ率を評価した。無歪み状態でのFET特性は、誘電体に正の固定電荷を持つSiO₂シェルを用いた場合はn型電子輸送特性を示し、負の固定電荷を持つAl₂O₃シェルの場合はp型特性を示した。また、歪み作用時のSiCNWの抵抗変化率においても、SiO₂被覆NWはn型半導体特有の負のゲージ率を示し、Al₂O₃被覆NWは正のゲージ率を示した。さらに、ゲート電圧の増減により、ゲージ率は大きく変化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた、半導体ナノ細線のピエゾ抵抗効果に及ぼす表面電位と弾性ひずみの影響に関する知見は、超小型機械量センサの実現に資するものである。低不純物濃度をもつ半導体ナノ細線において、そこにわずかに含まれる不純物を考慮してシェルを効果的設計・形成することで巨大なピエゾ抵抗効果を発現しうること、またそれを外部電界により制御しうることが示された。本研究で評価を行ったSiCはワイドギャップ半導体の一つであることから、その高温下での優れた材料特性と本研究で得られた知見を活用することで、過酷環境下で高信頼性をもつ超小型機械量センサへの応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the effect of surface potential on the piezoresistive effect of SiC nanowires (NWs), FET-type bending test devices including single SiCNW wrapped by SiO₂ or Al₂O₃ dielectric materials were fabricated, and the gauge factor of SiCNWs was evaluated by varying the gate voltage under bending straining. The FET characteristics in the unstrained state showed n-type electron transport characteristics when the SiO₂ shell with a positive fixed oxide charge was used as the dielectric, and p-type characteristics when the Al₂O₃ shell with a negative fixed oxide charge was used. In the resistance change rate of SiCNW under bending straining, the SiO₂-coated NW showed a negative gauge factor such as n-type semiconductors, while Al₂O₃-coated NW had a positive gauge factor. Furthermore, the gauge factors changed significantly with the increase or decrease of the gate voltage.

研究分野：MEMS、実験ナノメカニクス

キーワード：MEMS SiC Nanowire Field effect transistor 表面電位

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、カーボン系、シリコン(Si)系、あるいは酸化物系の半導体ナノ細線の結晶成長研究が活発になり、これらナノ細線の電子デバイスやマイクロセンサへの応用が期待されている。とくに、Si系半導体ナノ細線は、機械的な弾性歪みの付与によって電子物性、光物性、あるいは磁気特性などの各種物理特性をチューニングできる可能性が見いだされ(この種の学術分野をElastic Strain Engineeringと呼ぶ)、これらナノ細線を大規模センサネットワーク用機械量センサの検出素子として適用することが期待されている。これは、半導体ナノ細線が、既存センサが抱える「小型化に伴う検出感度の低下」という本質的課題を根本的に解決できる素子材料としての利用が期待でき、かつ超低消費電力センサの実現可能性が高いことに由来している。

これまでに、ワイドギャップ半導体の一つであるシリコンカーバイド(SiC)からなるナノ細線において、MEMS技術を応用した歪み制御デバイスを用いた詳細な評価により、コアシェル構造化による電気伝導度の変化と巨大なピエゾ抵抗効果の発現を報告している。この現象は、弾性ひずみだけでなく、シェル膜による表面電位がSiCナノ細線の電気伝導性におよぼす影響を無視できないことを示しており、これらの関与を詳らかにすることで巨大なピエゾ抵抗効果を利用した高感度検出素子への応用が期待される。

2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では、“半導体ナノ細線のElastic Strain Engineering”に基づいた超小型機械量センサの実現を目指して、弾性ひずみ、コアシェル構造のシェル膜に由来する表面電位、および外部電界による表面電位のそれぞれの制御が可能な評価デバイス構造を開発し、SiCナノ細線の電気伝導性、特にピエゾ抵抗効果に弾性ひずみと表面電位が与える影響の解明を目指す。具体的には、一本のSiCナノ細線をチャンネルとする電界効果トランジスタ(FET, Field effect transistor)構造を持つ評価デバイスを開発し、異なる固定電荷をもつ材料をシェル膜として採用することでナノ細線にかかる表面電位を広く制御する。また上記に加え、ピエゾ抵抗効果の評価のため、微小な弾性ひずみをナノ細線に付与可能な評価デバイス構造とその制御手法も開発する。項目別の研究実施内容は、(1)『歪み制御を可能とするナノ細線集積FETデバイス』の構造設計および製作、(2)C/S SiCナノ細線のシェル膜の固定電荷が電気伝導特性に及ぼす影響の評価、(3)C/S SiCナノ細線の弾性ひずみ、および外部表面電位制御下でのピエゾ抵抗特性の評価、である。

3. 研究の方法

(1)『歪み制御を可能とするナノ細線集積FETデバイス』の構造設計および製作

弾性ひずみと表面電位がピエゾ抵抗効果に及ぼす影響を評価する手法として、FET型計測デバイスの構造設計と、曲げ試験を応用したナノ細線の弾性ひずみ制御手法の開発を行う。

図1に、それらを組み合わせた『歪み制御を可能とするナノ細線集積FETデバイス』の模式図を示す。SiCナノ細線に与える弾性ひずみの制御方法として、4点曲げ法を応用した制御方法を採用する。微小幅の溝構造(マイクロトレンチ)を設けた評価デバイス上にSiCナノ細線を架橋配置し、デバイス全体をたわませてナノ細線の両端固定部に変位を生じさせることで、ナノワイヤに微小な弾性ひずみを与える。SiCナノ細線および基板材料の持つ材料物性を考慮した構造寸法設計を行い、所望の微小弾性ひずみの付与を可能な評価デバイスを実現する。

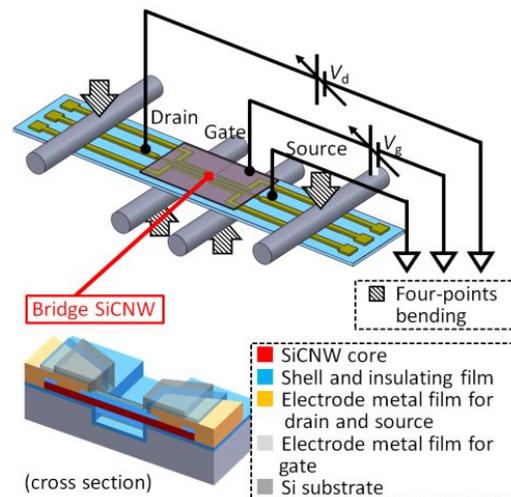


図1 『歪み制御を可能とするナノ細線集積FETデバイス』の模式図。

(2)【C/S SiCナノ細線のシェル膜の固定電荷が電気伝導特性に及ぼす影響の評価】

SiCナノ細線の周囲を絶縁薄膜で被覆したC/Sナノ細線構造からFET構造を形成し、ゲート電圧による表面電位制御を可能とする。また、シェルとなる絶縁薄膜には、それぞれ正と負の固定電荷をもつシリコン酸化膜とアルミナ膜を採用する。化学気相成長法および熱原子層堆積法を用いた成膜によってナノ細線周囲を完全に覆う薄膜を形成する。また準静的CV(Quasi-static C-V)法を用いて両絶縁薄膜の特性の評価も実施する。以上の2つの手法でSiCナノ細線の表面電位の制御を行い、ナノ細線の電気伝導性に及ぼす影響を明らかにする。

(3)【C/S SiCナノ細線の弾性ひずみ、および外部表面電位制御下でのピエゾ抵抗特性の評価】

4点曲げ法の応用によりナノワイヤに付与される弾性ひずみを正確に推定するため、微細加工によって生じる表面加工形状と、C/Sナノ細線構造を構成する各材料の物性を考慮した有限要素解析を実施し、FETデバイスのたわみ量とナノ細線に生じる弾性ひずみの関係を導出する。

項目(2)の手法と合わせ、それぞれの弾性ひずみ、および表面電位の制御下におけるナノ細線

の電気伝導特性を真空環境で計測し、弾性ひずみと表面電位の影響の詳細な解明をはかる。

4. 研究成果

(1) 【『歪み制御を可能とするナノ細線集積 FET デバイス』の構造設計および製作】

マイクロプロセス技術により、『歪み制御を可能とするナノ細線集積 FET デバイス』の作製に成功した。図 2 に、評価デバイス上に架橋設置された後にコアシェル構造化された SiC ナノ細線の SEM 像を示す。結晶成長させた SiC ナノ細線群から、電子顕微鏡内でのナノプローブ操作により単一の直径 30~40nm の SiC ナノ細線を評価デバイスの所望の位置に配置した。本研究で使用する C/S SiCNW は成長過程でドーピングを行っていないが、触媒となる $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ からわずかに Fe イオンが供給されて、低不純物濃度の p 型半導体としてふるまう。続く微細加工によって、ナノ細線両端がゲート電極およびソース電極に接続された、単一のナノ細線をチャンネルとする FET 構造を形成した。ここでシェル外径は両シェル材料でともに約 0.3 μm 、架橋部分長さは約 3 μm とした。

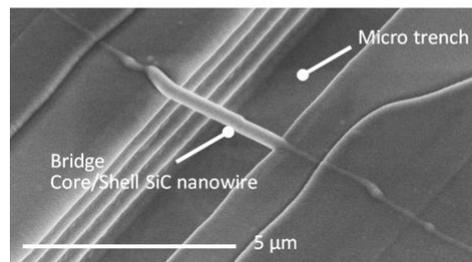
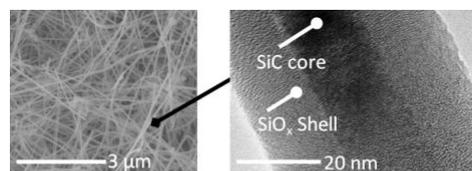


図 2 結晶成長 SiC ナノ細線群と評価デバイス上に架橋されてコアシェル構造化された SiC ナノ細線の SEM 像。

(2) 【C/S SiC ナノ細線のシェル膜の固定電荷が電気伝導特性に及ぼす影響の評価】

図 3a に、弾性ひずみとゲート電圧をどちらも与えない場合の、C/S SiC ナノ細線のドレイン電圧-電流 (V_d - I_d) 特性を示す。アルミナ膜シェルの場合においてはドレイン電圧が 0 V 近傍でショットキー特性が見られるが、C/S SiC ナノ細線の抵抗率はアルミナ膜シェルと酸化膜シェルでそれぞれ 0.8 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ($V_d = 2.0$ V の場合)、2.4 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ($V_d = 1.5$ V の場合)であり、大きな違いはみられなかった。このアルミナ膜シェルの抵抗率は、ポロドーピングを行った 3C-SiC が $0.8 \sim 1.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の、極めて低い不純物濃度を持つ場合と同程度である。

一方で、図 3(b)に示すように、ゲート電圧 V_g を与えた際のドレイン-ソース間電流 I_d とゲート電圧 V_g の関係は、シェルをアルミナ膜と酸化膜とする場合で大きく異なった。酸化膜シェルの場合には V_g の増加に伴って I_d も増加する n チャネル FET の挙動を示し、一方で、アルミナ膜の場合には、 V_g の増加に伴って I_d が減少し、また $V_g > 0\text{V}$ においてほとんど電流が流れない、デプレッション型 p チャネル FET の挙動を示した。

これらの結果より、不純物濃度の低い p 型の C/S ナノ細線においてはシェルの持つ固定電荷による表面電位が導電性に強く影響することが示された。固定電荷が正の、酸化膜のシェルの場合は、C/S SiC ナノ細線のコア界面に大きな空乏領域を形成してコア中央部の正孔の伝導領域を減少させ、これにより空乏領域の少数キャリアの電子が導電性に寄与したことが示唆された。一方で固定電荷が負の、アルミナ膜のシェルで場合の FET の挙動は、SiCNW コア界面に正孔の蓄積領域が形成されて正孔が導電性に支配的であることを示すものである。

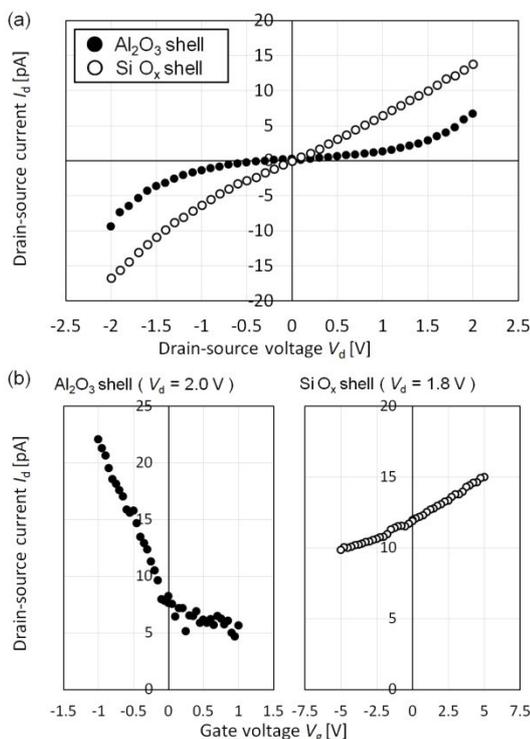


図 3 弾性ひずみを与えない場合の C/S SiC ナノ細線の電気伝導特性。

(3) 【C/S SiCNW の弾性ひずみ、および外部表面電位制御下でのピエゾ抵抗特性の評価】

4 点曲げによって C/S SiC ナノ細線に与えられる弾性ひずみは、微細加工後の評価基板の形状をもとに有限要素解析を用いて導出した。図 4 は、評価デバイスをたわませることで生じる C/S SiC ナノ細線の弾性ひずみ分布の解析結果を示したものである。計測対象である SiC ナノ細線の寸法はきわめて微小であることから、微細加工により形成される表面形状の影響を無視することはできない。そのため、電子顕微鏡観察による加工形状分析とそのモデル化を行うことで、

弾性ひずみ計算の正確さを向上させた。

C/S SiC ナノ細線の弾性ひずみとゲート電圧を変化させて真空下で導電性の評価を実施した。図5は弾性ひずみの増加に伴うC/S SiC ナノ細線の抵抗の変化比率を示したものである。この評価の結果、シェルの違いによりピエゾ抵抗効果が大きく変化することが示された。酸化膜シェルの場合にはひずみの増加に伴って抵抗値が減少し、一方でアルミナ膜シェルの場合には抵抗が増加する傾向がみられた。ゲート電圧 $V_g = 0\text{ V}$ におけるゲージ率は、酸化膜シェルが -7.9 ($\epsilon = 0.36\%$ の場合) に対して、アルミナ膜シェルは 115.6 ($\epsilon = 0.38\%$ の場合) であり、シェルの種類によってゲージ率が負から正へと変化する。また、特にアルミナ膜シェルのゲージ率は極めて大きな値となりうることが示された。

また、C/S ナノ細線の抵抗変化にゲート電圧が及ぼす影響もシェルにより大きく異なることが確認された。酸化膜シェルの場合にはゲート電圧の影響をほとんどみられないが、アルミナ膜シェルの場合には負のゲート電圧を与えることで、その抵抗変化の比率が増加する傾向がみられた。引張ひずみ $\epsilon = 0.38\%$ におけるゲージ率は、ゲート電圧 V_g を -0.5 V 与えることで、 274.6 まで増加し、ゲート電圧 $V_g = 0\text{ V}$ の場合の2倍以上の値を示した。

これらの結果は、先述の弾性ひずみを与えない場合での導電性と同じように、シェルの持つ固定電荷がC/S ナノ細線の導電性にきわめて大きな影響をもたらすことを示すものである。正の固定電荷をもつ酸化膜シェルの場合には、弾性ひずみを与えない場合においてもすでにナノ細線のコア中央部に正孔の伝導領域は減少させられており、ここに正のゲート電圧を与えても大きな変化は引きおこなえなかつたためである。一方で負の固定電荷をもつアルミナシェルの場合には、主要なキャリアの正孔がナノ細線のコアとシェルの界面に引き付けて蓄積されており、ここに負のゲート電圧が加わることでこれが促進されて、弾性ひずみ下の抵抗変化率の変化を生じさせたものと考えられる。

本研究で得られた、半導体ナノ細線のピエゾ抵抗効果に及ぼす表面電位と弾性ひずみの影響に関する知見は、超小型機械量センサの実現に資するものである。低不純物濃度をもつ半導体ナノ細線において、そこにわずかに含まれる不純物を考慮してシェルを効果的設計・形成することで巨大なピエゾ抵抗効果を発現しうること、またそれを外部電界により制御しうることが示された。本研究で評価を行ったSiCはワイドギャップ半導体の一つであることから、その高温下での優れた材料特性と本研究で得られた知見を活用することで、過酷環境下で高信頼性をもつ超小型機械量センサへの応用が期待される。

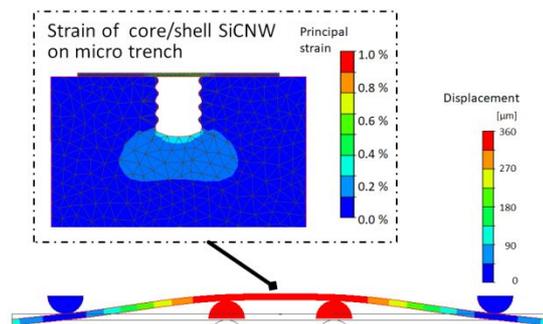


図4 評価デバイスの曲げ変形で生じるC/S SiC ナノ細線のひずみ

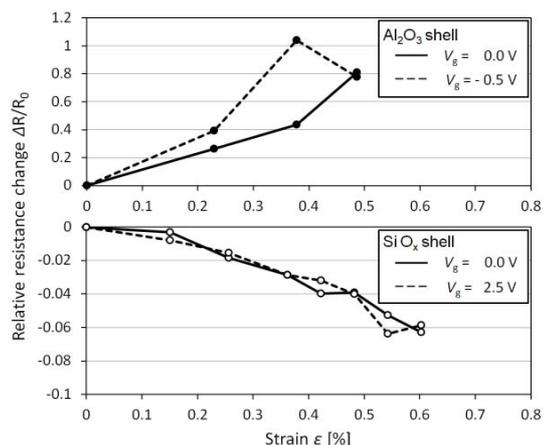


図5 弾性ひずみとゲート電圧変化に対するC/S SiC ナノ細線の抵抗の変化比率。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 S. Nakata, A. Uesugi, K. Sugano, F. Rossi, G. Salviati, A. Lugstein, Y. Isono	4. 巻 30
2. 論文標題 Strain engineering of core-shell silicon carbide nanowires for mechanical and piezoresistive characterizations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 12 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6528/ab0d5d	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 井ノ山 滉大, 仲田 進哉, 上杉 晃生, 菅野 公二, 磯野 吉正
2. 発表標題 コアシェルSiC ナノワイヤの電気伝導性に及ぼすシェル表面電位の影響
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akio Uesugi, Shinya Nakata, Kodai Inoyama, Koji Sugano, and Yoshitada Isono
2. 発表標題 Anomalous piezoresistive changes of core-shell structured SiC nanowires
3. 学会等名 The 34th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshitada Isono
2. 発表標題 MEMS-based strain engineering for epitaxial grown semiconductive nanowires
3. 学会等名 8th International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	菅野 公二 (Sugano Koji) (20372568)	神戸大学・工学研究科・准教授 (14501)	

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
---------	---------