

研 究 報 告 書

「縦型立体構造デバイス実現に向けた半導体ナノワイヤの研究」

研究期間：平成19年10月～平成23年3月

研究者：深田 直樹

1. 研究のねらい

本研究では、現行の平面型 MOSFET に代わる次世代型 MOSFET として、縦型立体構造を有するサラウンディングゲートトランジスタ(Surrounding Gate Transistor: SGT)の実現に向けた研究を行う。特色としては、SGT 構造で最も重要なチャンネルに着目し、1次元構造を有する半導体ナノワイヤに重点をおいた研究を行う。SGT 構造を採用することの利点は、トランジスタの高密度化・短チャンネル化が図れるとともに、ゲートからの電場をチャンネル周りの全ての方向から制御できるため、チャンネル中のキャリア密度を効率的に制御できる点にある。したがって、相互コンダクタンスが増加し、短チャンネル効果やサブスレッショルド特性が改善した超低消費電力の FET となる。このような SGT の発想自体は既に提案されているが、その実現には克服すべき多くの課題が残っており、その解決が重要となっている。例えば、1)SGT 構造の作製法、特に SGT で最も重要な伝導チャンネルとしてのナノワイヤの形成法、2)そのサイズ・配列・構造制御、3)機能発現のためのドーパント不純物のドーピング技術およびその評価法の確立、4)ドーパント濃度および位置の制御、5)ナノワイヤ内でのドーパント不純物の挙動の解明、6)ナノワイヤへの低抵抗コンタクトの形成等が挙げられる。特に、SGT の特性を最大限に引き出すためには、ナノスケールでのドーパント原子の制御が重要となっている。そのためにはドーパント原子の結合および電子状態等を調べる必要があり、物性評価による知見およびそれに基づく制御無しには、ナノ構造体を用いた次世代素子の構造設計は成り立たないといえる。本研究では、分光学的手法によりドーパント不純物の結合および電子状態、更には応力歪の値を詳細に調べ、それをナノワイヤの構造制御に反映させることを目的にしている。プロセスの確立から特性評価までを一貫して行うことで、上述の未解決な課題を克服し、次世代立体デバイスの産業化に繋げるのがねらいである。

2. 研究成果

以下に具体的な研究成果について紹介する。

Siナノワイヤ

2-1. Si ナノワイヤの成長制御と機能化のための不純物ドーピング

本テーマのポイントは、高真空 CVD 装置により表面・界面およびサイズ・構造が精密に制御された半導体 Si ナノワイヤの成長技術を確立することである。Si ナノワイヤの成長を高真空 CVD 装置により行うことで、転位および積層欠陥などの欠陥がなく、不純物の影響の少ない高品質な Si ナノワイヤの成長が実現できる。この高品質なナノワイヤを用いることにより、ナノワイヤのサイズ・構造にのみ依存した本質的な特性を調べることができると期待される。ここでの第一のターゲットは、ナノワイヤの径および構造をナノスケールで制御できるようにすることである。

高真空 CVD 装置を用いることにより、成長軸方向に径の均一な Si ナノワイヤの成長を実現することができた。透過電子顕微鏡での観察を行った結果、Si ナノワイヤの中心にはっきりとした格子縞を観察でき、結晶性の優れた高品質な Si ナノワイヤが成長できていることがわかった(図 1)。当初、径の制御に関しては、金属触媒として用いた金ナノコロイドの基板表面での凝集が影響し、数ナノメートルの精度でナノワイヤの径を制御することはできなかった。そ

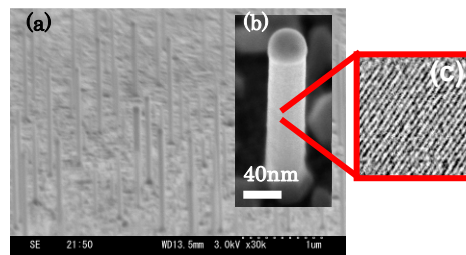


図1. CVDにより成長したSiナノワイヤの (a) SEM, (b) TEM, および (c) HRTEM像。

ここで、金ナノコロイドが凝集するまでに一気に一次元方向への成長を行えるように、現行のCVD装置に改良を加えた。その結果、金ナノコロイドの凝集を抑制し、直径の制御が可能になった。

第二のターゲットは、Siナノワイヤの成長中に不純物ドーピングを行い、p型およびn型制御を行うことである。ここで重要となるのが、Siナノワイヤ中にドーパされた不純物の結合・電子状態を評価できる手法を確立することにある。Siナノワイヤの成長中に不純物ドーピングを行った結果、Si中でn型ドーパントであるリン(P)およびp型ドーパントであるボロン(B)のドーピングに成功し、n型およびp型のSiナノワイヤを生成することができた。顕微ラマン散乱測定の結果、Bの局在振動を約 618cm^{-1} および 640cm^{-1} の位置に観測することにBをドーパしたSiナノワイヤにおいて初めて成功した(図2(a),(b))。さらに、そのSi光学フォノンピークに、高濃度Bドーピングによる価電子帯内での連続的なレベル間での遷移と、離散的なフォノンのレベルとのカップリングによって生じるファノ効果による非対称ブロードニングも観測することに初めて成功した(図2(a))。Pドーピングを行った試料では、電子スピン共鳴(ESR)測定の結果、伝導電子のESRシグナル(g 値1.998)を観測することにSiナノワイヤにおいて初めて成功した(図2(c))。以上の結果は、BおよびPがSiナノワイヤ中のSi置換位置にドーパされ、活性化していることを分光学的に初めて証明した結果となっている。

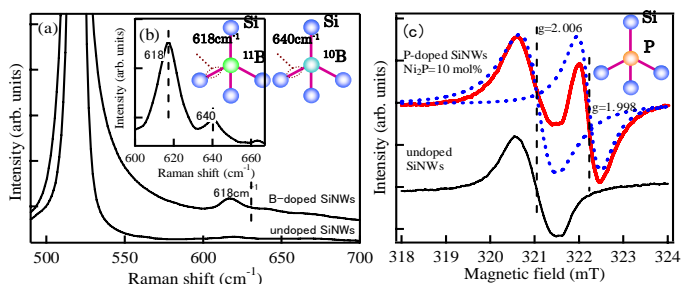


図2. (a) B-doped SiNWsおよび undoped SiNWsのラマンスペクトル. (b) その拡大図. (c) P-doped SiNWsおよび undoped SiNWsのESRシグナル.

2-2. イオン注入を利用した不純物ドーピング

ナノワイヤのトランジスタへの応用を考えた場合、不純物ドーパ量の制御は重要であり、現在の半導体プロセスを考慮すると、イオン注入によるドーピングについて調べる必要がある。

イオン注入では、ナノワイヤへの不純物ドーパ量を制御できる反面、欠陥の除去が重要な課題となる。そこで、イオン注入後のナノワイヤの結晶性回復と不純物の電気的活性化について調べた。PおよびBの注入および活性化アニール後に、低温ESR測定による伝導電子シグナルの観測、およびラマン散乱測定によるB局在振動・Fanoブロードニングの観測からSiナノワイヤにイオン注入によりドーパされたPおよびBが電気的に活性化されたことを確認できた。しかしながら、ナノワイヤ内の結晶性をTEM観察により詳細に調べたところ、Pでは 1×10^{14} – $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ のドーズ量、Bでは 1×10^{15} – $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ のドーズ量では、単結晶ではなく多結晶になっていることがわかった。これは、高いドーズで注入を行った為に元の結晶方位がメモリーされず、結晶化において重要な核発生・形成がランダムに起こってしまったためである。また、Siナノワイヤでは歪の影響により、欠陥がアニールアウトされにくいことも原因の1つとして考えている。一方、それ以下のドーズでは単結晶化が確認された。また、高温でイオン注入を行った場合にはより単結晶が得られやすいことも分かった。以上の結果から、イオン注入をナノワイヤへの不純物ドーピングに応用する場合には、低ドーズ且つ長時間注入、或いはホットインプランテーションが効果的であることが分かった。

2-3. 不純物の偏析挙動と動径分布

ここまでは、Siナノワイヤへの不純物のドーピングと状態評価に関する結果を述べてきたが、不純物の挙動についても調べる必要がある。Siナノワイヤトランジスタを考えた場合、その周りは絶縁膜で覆われており、酸化膜(SiO_2)が1つの候補であることから、酸化膜形成過程でのSiナノワイヤ中のドーパント不純物の挙動を明らかにすることは重要である。そこで、成長時にBおよびPをドーパしたSiナノワイヤにおいて、 900°C の酸素雰囲気中での熱酸化実

験を行い、BおよびP原子のナノワイヤ中での挙動について調べた。

B 原子に関しては、ラマン散乱測定で観測される B 局在振動ピーク強度および Fano ブロードニングの変化から調べた。一方、P 原子に関しては、低温 4.2K での電子スピン共鳴により観測される伝導電子シグナルの強度変化から調べた。図 3 に示されるように、B 局在振動ピーク強度は僅か 30 分の熱酸化で急激に減少するのに対して、伝導電子シグナルの強度は最初の 60 分まではそれほど変化が無く、その後減少した。この結果は、熱酸化過程において、B は P に比べて圧倒的に酸化膜中へ偏析しやすいことを示している。モデル図にも示されているように、P ではナノワイヤ中での最大固溶度を超えるまでは酸化膜側でなく、Si 側にパイルアップする傾向にあり (P-I)、ナノワイヤの径が減少し、最大固溶度を超えたところでようやく酸化膜側への析出が開始するのである (P-II)。90 分以降の熱酸化では、B および P ともに変化が見られなくなった (B-III, P-III)。これは、酸化の進行でナノワイヤ周りに形成された厚い酸化膜が中心の結晶コアにたいして圧縮の歪を与えるようになるため、酸化の進行がストップし、B および P の偏析が停止したと考えられる。この効果は、酸化の自己停止と呼ばれており、酸化が停止すると、ナノワイヤ中の不純物の偏析も停止することが分かった。

Si ナノワイヤ中において、B および P 原子が動径方向にどのように分布しているのかは非常に興味深いテーマである。なぜなら、表面・界面の割合が高いため、動径方向分布に偏りが発生する可能性があるからである。分布を評価するために、繰り返しエッチングを行った。まず、Si ナノワイヤの表面酸化膜をフッ酸で除去する。それを大気中に取りだすと、ナノワイヤの表面は再酸化される。再度、この酸化膜をフッ酸で除去し、大気中に取りだし、再酸化させるプロセスを繰り返す。ここで、自然酸化膜はおよそ 2nm の厚みで形成されるので、B 局在振動ピークおよび伝導電子シグナル強度の変化を調べれば、Si ナノワイヤ中の B および P 原子の動径方向分布に関する情報が得られる。

P の結果を図 4 に示す。繰り返しエッチングにより、伝導電子シグナル強度が減少しているのが分かる。

界面付近に極端に P が分布していることは無いのだが、ナノワイヤ中の界面に近い領域に優先的に分布していることが確認できた。B についても同様の傾向を示すことが分かった。即ち、Si ナノワイヤでは、界面に近づくほど緩和の度合いが大きいため、異種不純物の占める割合が高くなるのだと考えられる。第一原理計算で Si ナノワイヤ中の不純物原子の安定位置について調べた結果でも、界面に近いサイトがより中心の領域よりも不純物が安定に存在できるという結果が報告されており、今回の結果はその理論計算の傾向とも一致している。

Geナノワイヤへの展開

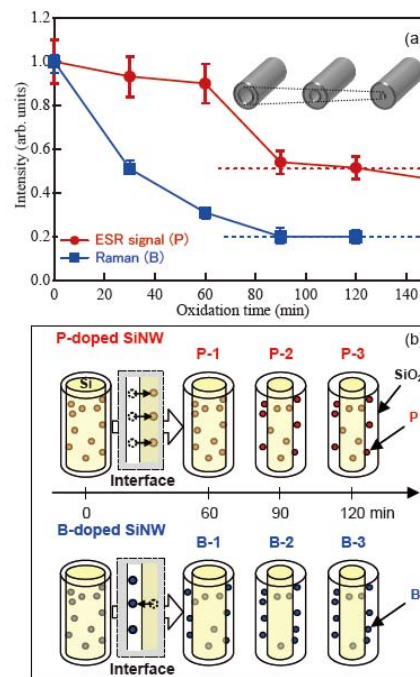


図3. (a) ラマン散乱およびESR測定により調べたBおよびP原子のSiNWs中での偏析挙動の酸化時間依存性および (b) そのモデル図。

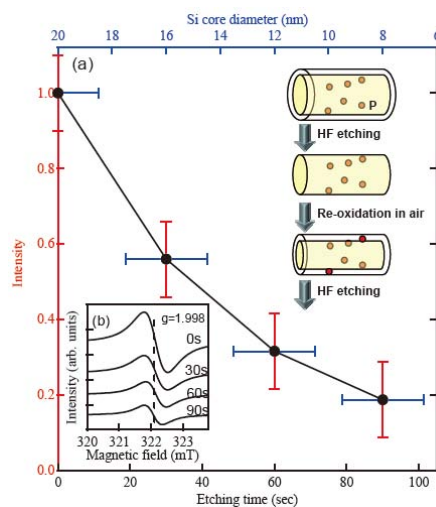


図4. (a) 繰り返し酸化エッチングによる伝導電子シグナル強度のエッチング時間依存性と (b) そのESRシグナル。

2-4. 半導体Geナノワイヤの成長および不純物ドーピング

現行の平面型Si MOSFETに対して更に素子のパフォーマンスを向上させるためには、材料の観点からも改善を考える必要があり、Siよりも高い移動度を持つ材料への変換が求められている。Ge中のキャリアの移動度(電子: $3900\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、正孔: $1900\text{cm}^2/\text{Vs}$)は、Si中(電子: $1600\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、正孔: $430\text{cm}^2/\text{Vs}$)よりも高いため、Geは1つの有望な材料である。したがって、1次元の構造を有するナノワイヤで、Geナノワイヤが次世代MOSFETの基幹材料になる可能性は十分にあるといえる。そこで、既述のCVD装置を利用してGeナノワイヤの成長制御実験および不純物ドーピングを行った。

成長したGeナノワイヤのSEM、TEM像を図5に示す。不純物をドーピングしない場合には、成長軸方向に径の均一なGeナノワイヤの高密度成長を実現することができた。直径の平均はおよそ20nmである。高分解能TEM観察によりGeナノワイヤ内部を調べたところ、結晶に起因する格子縞が明瞭に観測され、内部には全く欠陥が観測されなかった。

次にBドーピングの結果について説明する。Bドーピングではドーパントガスであるジボランの流量が増大、即ち、Bのドーピング量が増大するに伴って成長軸方向の径が不均一になり、テーパ構造になる。これは、成長時に添加されるBがナノワイヤ表面へのGeの堆積を促進し、成長軸方向に加えて動径方向の成長が促進されたためである。一方、Pドーピングの場合には、ドーパントガスであるホスフィン(III)の流量が増大するに伴って若干テーパ構造になるが、Bの場合ほど大きな変化を与えない。以上の結果から、成長時にBドーピングを行う場合には動径方向への成長に注意する必要があるといえる。これを回避する方法として、3段階でのドーピングを行い、径の均一化を達成することができた。その際、ナノワイヤ成長後の不純物ドーピングは成長時に比べて困難であるという、ナノ構造に特有のself-purification効果についても実証することができた。

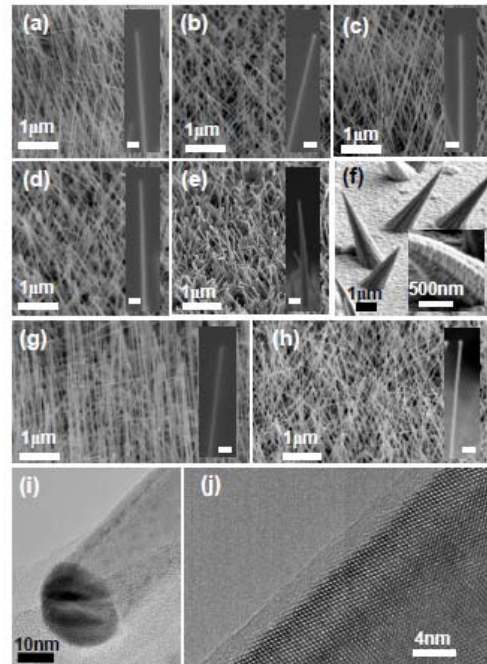


図5. GeNWsのSEM像。(a) $\text{GeH}_4:\text{B}_2\text{H}_6=10:0$ 、(b) $10:0.2$ 、(c) $10:0.4$ 、(d) $10:0.7$ 、(e) $10:1.0$ 、(f) $10:2.2$ 。挿入図のスケールは20 nm。P-doped GeNWsのSEM像。(g) $\text{GeH}_4:\text{PH}_3=10:1.0$ 、(h) $10:7.0$ 。挿入図のスケールは30 nm。undoped-GeNWsの(i) TEM像、(j) 高分解能TEM像。

2-5. 不純物の結合・電子状態および電気的特性評価

Geナノワイヤ中の不純物の結合・電子状態を評価できる手法を確立することは、Siナノワイヤの場合と同様に非常に重要である。Siの場合と異なり、BおよびPともに質量がGeと大きく異なるため、ラマン散乱測定を利用してそれぞれの局在振動を観測できるはずである。しかしながら、Siの場合と異なりGeでは、バルク結晶においてすら、BおよびPに関する局在振動モードの報告はこれまでなく、Geナノワイヤ中にドーピングされたドーパント不純物の検出と状態の解明は、非常にチャレンジングな重要研究課題であった。顕微ラマン散乱測定の結果、Bの局在振動を

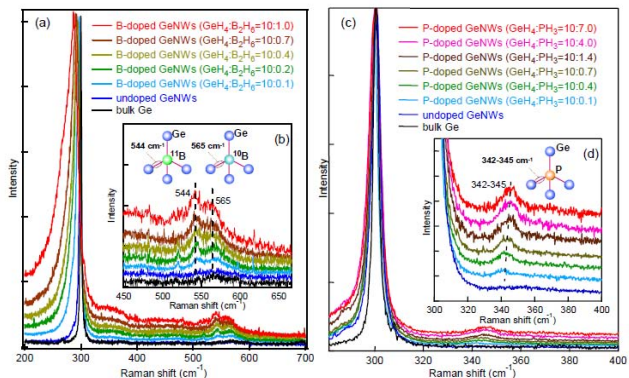


図6. (a) B-doped GeNWsおよび(c) P-doped GeNWsのラマン散乱測定結果。(b) および(d)はそれぞれの拡大図。

約 544cm^{-1} および 565cm^{-1} の位置に、Pの局在振動を約 $342\text{--}345\text{cm}^{-1}$ の位置に観測することに初めて成功した(図 6)。更に、そのSi光学フォノンピークに、高濃度ドーピングによる生じるファノ効果による非対称ブロードニングも観測することにも初めて成功した。以上の結果は、BおよびPがGeナノワイヤ中のGe置換位置にドーピングされ、電氣的に活性化していることを分光学的に初めて証明した結果となっている。

次に、図 7 に示すような素子を形成し、単一Geナノワイヤの電氣的特性評価を行った。Geナノワイヤの表面酸化膜は電子ビームリソグラフィの際にダメージを受けやすく、当初、プロセス後にGeナノワイヤが消失してしまう問題があった。本研究では、Geナノワイヤの表面を Al_2O_3 で1nm皮膜することで、リソ耐性を格段に上げ、素子作製が可能になった。p型およびn型Geナノワイヤの特性をそれぞれ評価したところ、明瞭なp型およびn型ゲートバイアス依存性を確認することができた。また、移動度を評価した結果、p型の場合で約 $100\text{cm}^2/\text{Vs}$ であった。移動度が予想される値よりも低い理由としては、

1) Bドーピングによる不純物散乱、2) 表面・界面ラフネスの影響、および 3) 素子作製の問題等が考えられる。1)の問題に関しては次に解決策を示す。

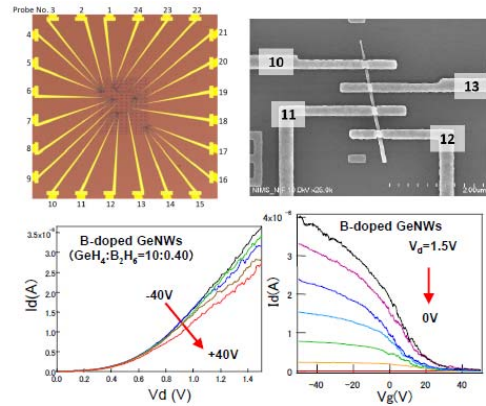


図7. GeNWの素子の作製例とI-V評価結果。

Si/Geコアシェルナノワイヤ

2-6. 不純物散乱抑制のための Si/Ge コアシェルナノワイヤの成長制御

単元素からなるナノワイヤでは、不純物ドーピングによる不純物散乱の影響は避けられず、ナノワイヤの構造を最大限に生かすことができない。そこで、SiとGeのコアシェル構造からなるナノワイヤを形成し、バンドオフセットの構造に基づいてコア或いはシェル層への位置制御ドーピングを行い、不純物のドーピング領域とキャリアの輸送領域を完全に分離した、不純物散乱を徹底的に抑制できる高移動度チャネルを形成するのが本研究の狙いである。

3種類のコアシェル構造として、電子をキャリアとし利用する Si/GeP (構造 I) コアシェルナノワイヤおよび正孔をキャリアとして利用する SiB/Ge (構造 II)、Ge/SiB (構造 III) コアシェルナノワイヤを作製した。図 9 に示す EDX の結果から、3タイプの異なるコアシェルナノワイヤが作製できているのが分かる。シェル層の結晶性を高分解能 TEM 観察により調べた結果、ヘテロエピタキシャル成長が実現できており、転位等の欠陥の無い高品質なシェル層が形成されていることが確認できた。また、ラマン散乱測定でも、光学フォノンピークにより良好な結晶性を確認できた。

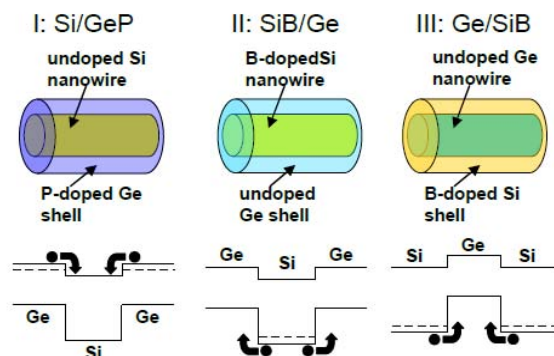


図8. Si/Geコアシェルナノワイヤのモデル図とバンド概略図。

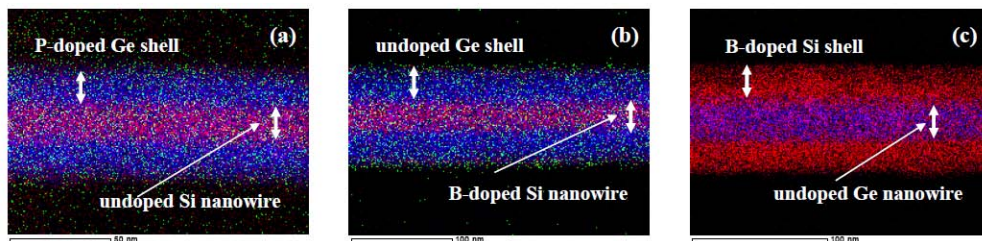


図9. (a) Si/GeP (b) SiB/Geおよび(c) Ge/SiBのEDXによる組成分析結果。

2-7. Si/Ge コアシェルナノワイヤの位置制御ドーピング効果と応力の評価

一般的に、歪はキャリアの移動度に大きな影響を与えるため、その評価と制御は重要である。コアシェル層内の歪は、コア・シェル層の組み合わせ、シェル層の厚み、シェル形成温度により変化する。コアおよびシェル各層の歪を評価するために X 線回折 (XRD) 法を用いて格子間隔の変化量を詳細に調べた結果、構造 I および構造 II では、コアには引っ張り応力、シェル層には圧縮応力が働いていることを明らかにした。不純物がドーピングされたことによるピークシフトに関しても明瞭に観測することができた。更に、ラマン測定および ESR 測定により、位置制御ドーピングが実現できていることを確認した。今後、コアシェル内の歪が移動度にどのような影響を与えるか調べる予定であり、最終的には、移動度向上においてコアシェル構造の優位性を実証する予定である。

まとめ

さきがけの研究期間で以下の成果を得ることができた。まず、縦型立体構造を有する次世代 MOSFET の基幹材料として期待されている 1 次元 Si ナノワイヤの成長制御を行い、直径 5-50nm の範囲での直径制御に成功した。更に、材料の観点からも MOSFET の性能向上を図るためにナノワイヤの成長技術を Ge にも応用し、Ge ナノワイヤの成長制御にも成功した。機能発現のためのドーピングを成長時およびイオン注入により行い、p 型および n 型制御の達成とナノワイヤ中の不純物を評価できる独自の手法を新たに確立することに成功した。具体的には、ラマン散乱測定によりナノワイヤ中にドーピングされた不純物の局在振動ピークおよび光学フォノンピークに現れる Fano 効果および ESR 測定による伝導電子シグナルの検出に初めて成功し、ナノワイヤ中の不純物の結合・電子状態を明らかにすることができた。更に、本手法を用いて、ナノワイヤ中の不純物の分布および挙動に関しても初めて明らかにすることに成功した。以上の成果に関しては成果の重要性が認められ、材料分野で権威のある Advanced Materials 誌の招待レビューを受けるとともに、MRS でも Best Poster Award を受賞している。

更に、1 次元構造を最大限に生かして、不純物散乱の影響を抑制できる Si と Ge からなるコアシェルナノワイヤの成長制御技術およびコア・シェル層それぞれへの位置制御ドーピング技術も確立することができた。本成果は、今後のナノワイヤを用いた次世代高速・低消費デバイス実現のためのキーテクノロジーになると期待できる。

3. 今後の展開

コアシェルナノワイヤの電気的特性評価を行い、不純物散乱抑制による移動度の増大効果を実証する。不純物散乱を抑制するためには、Si と Ge の界面が重要であり、界面での Si および Ge のミキシング抑制、それによる界面急峻性の向上、位置制御ドーピングの精度、およびシェルの結晶性等が重要となるため、それらを総合的に研究する。更に、結晶に誘起される応力はキャリア移動度に大きな影響を与えるため、コアシェルナノワイヤ中の応力と移動度の関係についても詳細な実験を行う予定である。以上の成果を総合的にまとめることで、IV 族半導体材料で最高の移動度を達成するチャネル材料の実現を目指す。

更に、さきがけでのナノ構造創製技術、不純物ドーピングとその評価技術を応用して、半導体ナノ構造を利用した新規高効率太陽電池材料および Li イオン電池用高容量負極材料の開発へと研究を展開していく予定である。

4. 自己評価

当初、さきがけの研究課題としては、次世代の縦型立体構造を有するトランジスタ実現において基礎・基盤技術となる Si および Ge ナノワイヤの成長制御、機能発現のためのドーピングとその状態評価手法の確立、不純物散乱を抑制できる Si/Ge コアシェルナノワイヤの形成、および電気的特性評価に代表される単一ナノワイヤの評価を掲げた。

実際、Si および Ge ナノワイヤの成長制御に関しては、既存の CVD 装置に改良を加えることで、5-50nm の範囲でナノワイヤの直径を制御できるようになった。不純物ドーピングに関しては、成長時および成長後のイオン注入により行い、p 型および n 型ナノワイヤの成長を実現できた。特に、Ge ナノワイヤ中の不純物分光に関してはバルクでも報告例は無い、チャレンジングな課題であったが、B および P 原子の局在振動ピークの観測と同定に成功できた。本研究により、直径数 nm～数十 nm という非常に微小なナノワイヤ中にドーピングされた B および P 原子の結合・電子状態を明らかにする新たな評価手法を確立できた点は大きかった。

また、ナノワイヤの 1 次元構造を最大限に生かして、不純物散乱を抑制できる Si と Ge からなるコアシェルナノワイヤの成長技術の確立とコア・シェルそれぞれへの位置制御ドーピング技術に関しても当初の目標通り達成することができた。一方、単一ナノワイヤの電気的特性評価に関しては研究の進行が遅れ、最終目標のコアシェルナノワイヤの評価まで行き着くことはできなかったが、Si および Ge ナノワイヤに関しては概ねデバイス作製プロセスを確立できたといえる。コアシェルナノワイヤにおける移動度評価に関しては今後の研究課題とする。

5. 研究総括の見解

深田研究者は、半導体集積回路のさらなる高密度化へのアプローチとして、半導体ナノワイヤを用いた縦型の電界効果トランジスタ(サラウンドゲートトランジスタ)を高密度に作製する技術に取り組んできました。本さがけ研究では、このためのシリコンおよびゲルマニウムナノワイヤの成長制御、機能発現のためのドーピングとその状態評価手法の確立、不純物散乱を抑制できる Si/Ge コアシェルナノワイヤの形成、および電気的特性評価に代表される単一ナノワイヤの評価を研究課題に掲げました。しかし、研究室建屋における火災、CVD 成長装置の水配管事故など、多くの困難な状況に見舞われたほか、独立して一人で行っている研究体制が裏目にも出てしまい、研究の進展が遅れました。

深田研究者は、この困難な状況を克服し CVD 装置を改良して、ナノワイヤの直径制御に成功したほか、p型、n型のドーピングに成功しました。さらに重要なのは、ドーピングしたナノワイヤ中の不純物の濃度がどれくらいあるか、それらは活性化(キャリアを供給しているか)の評価です。これまで、ナノワイヤという微細空間におけるこのような微量の不純物の評価技術はありませんでした。彼は、電子スピン共鳴分光とラマン分光によって、ドーピングされた微量のホウ素およびリンの濃度や活性化を定量的に判定する技術を確立しました。とくに、ゲルマニウムにおいては、バルクにおいても研究例がなかったのを、これを確立したことは、今後のナノワイヤトランジスタ開発に大きな貢献をしたと評価できます。さらに、コア・シェル構造のナノワイヤにおいて、コアとシェルのそれぞれにおける評価までも成功しました。

彼は、本領域においては、基礎にたつて半導体デバイスの評価ができるきわめて数少ない研究者で、領域会議において常に積極的に発言し、2 期生、3 期生に多い半導体研究者に対し、有益な示唆を与えてくれました。

半導体ナノワイヤ技術は、今後、集積回路だけでなく、超高効率太陽電池用途としても大変期待されている材料でもあります。深田研究者は、この分野のリーダーとして、この世界を先導してくれるものと期待します。

6. 主要な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1.	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", NANO Lett. (in press).
2.	N. Fukata, K. Sato, M. Mitome, Y. Bando, T. Sekiguchi, M. Kirkham, J-I. Hong, Z. L. Wang, and R. L. Snyder: "Doping and segregation of impurity atoms in silicon nanowires", ACS NANO 4, 3807-3816 (2010).
3.	F. Fabbri, F. Rossi, G. Attolini, G. Salviati, S. Iannotta, L. Aversa, R. Verucchi, M. Nardi, N.

	Fukata, B. Dierre, and T. Sekiguchi, "Enhancement of the core near-band-edge emission induced by an amorphous shell in coaxial one-dimensional nanostructure: the case of SiC/SiO ₂ core/shell self-organized nanowires", Nanotechnology 21 , 345702 (7 pages) (2010).
4.	N. Fukata: "Impurity doping in silicon nanowires ", Adv. Mater. 21 (27), 2829–2832 (2009).
5.	N. Fukata, M. Mitome, Y. Bando, M. Seoka, S. Matsushita, K. Murakami, J. Chen, and T. Sekiguchi: "Codoping of boron and phosphorus in silicon nanowires synthesized by laser ablation", Appl. Phys. Lett. 93 (20), 203106 (3pages) (2008).
6.	N. Fukata, S. Matsushita, N. Okada, J. Chen, T. Sekiguchi, N. Uchida, and K. Murakami: "Impurity doping in silicon nanowires synthesized by laser ablation", Appl. Phys. A. 93 , 589–592 (2008).
7.	J. Chen, T. Sekiguchi, N. Fukata, M. Takase, T. Chikyow, K. Yamabe, R. Hasunuma, M. Sato Y. Nara, and K. Yamada: "Comparison of leakage behaviors in p- and n-type metal-oxide-semiconductor capacitors with hafnium silicon oxynitride gate dielectric by electron-beam-induced current", Appl. Phys. Lett. 92 , 262103 (2008).
8.	S. Huang, N. Fukata, M. Shimizu, T. Yamaguchi, T. Sekiguchi, and K. Ishibashi: "Classical Coulomb blockade of a silicon nanowire dot", Appl. Phys. Lett. 92 (21), 213110 (2008).
9.	N. Fukata, J. Chen, T. Sekiguchi, S. Matsushita, T. Oshima, N. Uchida, K. Murakami, T. Tsurui, and S. Ito: "Phosphorus doping and hydrogen passivation of donors and defects in silicon nanowires synthesized by laser ablation ", Appl. Phys. Lett. 90 (15), 153117 (2007).

(2)特許出願

研究期間累積件数:5 件

- 発明者: 佐藤慶介、深田直樹
 発明の名称: ドライブプロセス装置
 出 願 人: 独立行政法人物質・材料研究機構
 出 願 日: 2009/1/16
- 発明者: 深田直樹、佐藤慶介
 発明の名称: ドーパント元素濃度計測方法
 出 願 人: 独立行政法人物質・材料研究機構
 出 願 日: 2008/12/3
- 発明者: 深田直樹、佐藤慶介
 発明の名称: 半導体ナノワイヤ及びその製造方法並びに縦型電界効果トランジスタ
 出 願 人: 独立行政法人物質・材料研究機構
 出 願 日: 2008/11/20
 特願 2008-296940

(3)その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

主要な学会発表

- Doping and characterization of impurity atoms in Si nanowires: N. Fukata, N. Saito, K. Sato, J. Chen, T. Sekiguchi, M. Mitome, Y. Bando, and K. Murakami, The 3rd International One-dimensional Nanomaterials, Atlanta, USA (Dec. 2009) Oral
- ボトムアップ手法によるシリコンナノワイヤの創製および不純物ドーピング: 深田直樹, 秋季第 70 回応用物理学会学術講演会 (Sep. 2009) 招待

3. Doping and segregation of impurity atoms in silicon nanowires: N. Fukata, M. Seoka, N. Saito, J. Chen, T. Sekiguchi, and K. Murakami, The 25th International Conference on Defects in Semiconductors, St. Petersburg, Russia (Jul. 2009) Oral
4. Phosphorus donors and boron acceptors in silicon nanowires synthesized by laser ablation: N. Fukata, M. Seoka, N. Saito, J. Chen, T. Sekiguchi, and K. Murakami, 2008 MRS Fall Meeting, Boston, USA (Dec. 2008) Poster
5. Impurity doping in silicon nanowires: N. Fukata, S. Matsushita, J. Chen, T. Sekiguchi, and K. Murakami, Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2007, Niigata, Japan (Nov. 2007) Oral, Invited

受賞

1. MRS Best Poster Award: Phosphorus Donors and Boron Acceptors in Silicon Nanowires Synthesized by Laser Ablation, Boston, USA, (Dec. 2008)