

平成 27 年度工学系共通経費による顕彰と研究助成 成果報告書

所 属	電子物理工学専攻
研究者(ふりがな)	小寺 哲夫 (こでら てつお)
タイトル	IV 族半導体微細構造を用いた高感度センサデバイスの開発
助 成 名	創成的研究賞
採択金額	1,000,000 円
<p>研究の背景</p> <p>小型で高感度な医療・生体向けの磁気センサデバイスの開発が求められている。必要となる要素技術は、安定したスピン状態の形成、高精度なスピンの操作、スピン間相互作用の制御、スピン状態の高感度な読み出し等である。また、スピニコヒーレンス時間が長いほど、磁気センサの感度が高まる。炭素やシリコン、ゲルマニウムでは、核スピンによるデコヒーレンスが少ないため、電子スピンのコヒーレンス時間が長く、これらの材料を用いた高感度な磁気センサデバイスの開発が期待されている。</p>	
<p>結果と考察</p> <p>小型で高機能な医療・生体向け電子デバイスの実現が望まれている。本研究の目的は、IV 族半導体微細構造中の単電子やスピン状態を利用して、将来的に高感度なセンシング機能を創発する新原理素子の開発を行うことである。エレクトロニクスを支えるIV族半導体テクノロジーをさらに発展させていくことで、情報分野のみならず環境分野や医療分野にも有用な素子の開発につながる研究である。</p> <p>本研究では、シリコン系量子ドットを用いて単電子状態やスピン状態を実現し、センサ応用に向けた基盤技術の開発を行った。具体的には、(1) ボトムアップ結晶成長技術の有効利用と (2) トップダウン微細加工技術の高度化、という両方のアプローチに取り組んだ。</p> <p>(1) ボトムアップ結晶成長技術を利用するアプローチでは、化学気相成長 (CVD) 装置を用いて、Ge を芯、Si を殻とする Ge/Si ナノワイヤ構造を実現した。具体的には、下記の手順による。まず、Si 基板上的金ナノ粒子を触媒にして 280°C で GeH<sub>4</sub> を流入することで、気相-液相-固相 (VLS) 成長法による Ge ナノワイヤ成長を行った。金触媒は電子線蒸着器を利用して形成したものである。Ge ナノワイヤの直径は 20 nm のものが得られた。その後 Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> を原料に 450°C で Si を Ge ナノワイヤの周囲に CVD 堆積することで、Ge/Si ナノワイヤを実現した。Si の厚みは 2 nm 程度だった。作製した Ge/Si ナノワイヤに対して位置合わせ技術を適用した電子線リソグラフィにより、電極を形成した。電気特性評価により、Ge 部分に正孔が閉じ込められ、<math>\sim 1.3 \times 10^5</math> S/cm という電気伝導率を有することが確認された。さらに、Ge/Si ナノワイヤに複数の微細電極を取り付けることで量子ドット構造を実現することができた。今後、量子ドット特性の測定に取り組む。</p> <p>(2) トップダウン微細加工技術の高度化を利用したアプローチでは、極微細なシリコン量子ドットを実現した。素子作製には、4 回の熱酸化と 3 回のフォトリソグラフィ・ウェットエッチングプロセスを繰り返すことで形成した 6 nm の極薄膜シリコン層を有する Silicon on insulator (SOI) 基板を用いた。素子抵抗を低く抑えるために、ソース・ドレイン部は 40 nm 程度のシリコン層を持つようにしてある。この基板に対して電子線リソグラフィ、エッチングおよび熱酸化を行うことによりシリコンナノワイヤに複数の狭窄領域を</p>	

形成することで量子ドット構造を作製した。バックゲートが形成されており、非ドープのシリコン層にキャリアを誘起するために用いた。本素子を 4.2 K において測定した結果、単一量子ドット中の単電子トンネル現象を示す規則的なクーロンダイヤモンドが明瞭に観測された。また、極薄膜 SOI を用いた効果として、チャージングエネルギーが 20 meV 程度という、通常の SOI を用いたものと比べて大きな値が得られた。

この実験結果を再現するために、3次元の詳細なデバイス構造のモデル化を取り入れた、ポアソン方程式とシュレディンガー方程式に基づく計算を行った。この計算手法の妥当性は、通常の SOI 基板を用いた素子の測定データを再現することで確かめてある。極薄膜 SOI 量子ドットに対する計算により、チャージングエネルギーをはじめとしてクーロンダイヤモンド構造の規則性などの実験データをよく再現することに成功した。この結果から、極薄膜 SOI を用いて設計通りの量子ドットを形成することができたと言える。さらに、極薄膜シリコン量子ドット内の電子数がたった1つだけ異なる状態を、近くに配置した単電子トランジスタセンサにより高感度に検出する技術の実証、および計算による実験データの再現も行うことができた。

以上のように、(1) ボトムアップ結晶成長技術の有効利用では、Ge/Si ナノワイヤ構造に対して複数の微細電極を取り付け、量子ドット構造を実現し、(2) トップダウン微細加工技術の高度化では、極薄膜シリコン量子ドット構造の作製と評価、また極薄膜シリコン量子ドットを用いた高感度な電荷センサを実現した。

結論と今後の課題

本研究では、IV族半導体微細構造として、Ge/Si ナノワイヤ構造と極薄膜シリコン量子ドット構造の作製と評価、また極薄膜シリコン量子ドットを用いた高感度な電荷センサの実現に成功した。今後は、これらの構造を用いて、単電子やスピン状態を利用した高感度な磁気センサの開発に取り組んでいく。測定技術の開発としては、高周波スピン操作、パルス測定系の構築を行っているところであり、この測定技術を用いることにより、磁気センサの感度にとって重要な物理量であるコヒーレンス時間を見積もる。また、電界を印加してスピン軌道相互作用やバレーとの相互作用を変調して、コヒーレンス時間を制御していく計画である。

使用内訳書

費目	内訳	金額
備品1		0
備品2		0
消耗品	金属蒸着源、素子作製材料、高周波部品、電子部品等	1,000,000
旅費		0
その他		0
合計		1,000,000

記入上の注意：

備品は、品名ごとに記入。

差額が生じた場合は、消耗品で調整。

消耗品を購入しなかった場合は、経費の差額と補填した予算科目名を合計額の内訳欄に記入。