

戦略的国際科学技術協力推進事業
日本－ドイツ研究交流
研究課題「三次元新機能ナノ構造の研究」

研究終了報告書

研究交流期間 平成20年1月～平成23年3月

研究代表者：平山祥郎
(東北大学大学院理学研究科、教授)

1. 研究・交流の目的

日独双方の研究参加者の得意分野を融合し、ナノスケールで制御が可能な革新的な三次元構造を実現する。さらに、これらを用いてインパクトの高い新機能を実現することを目指す。具体的にはポール・ドルテ研究所（以下 PDI）が有するチューブ構造・フリースタンディング構造に適したヘテロ構造の知識・ノウハウや革新的なウェハ貼りあわせ技術を、日本側（東北大学（以下東北大）、NTT 物性科学基礎研究所（以下 NTT））が有する高いレベルのヘテロ構造を用いた物性研究や化合物半導体メカニカル素子に関する研究と組み合わせる。バック側からもナノスケールでゲート制御が可能な構造を用い、電子相関・核スピン相関の研究を前進させると共に、化合物半導体ナノメカニカル構造の特徴を活かした新しいデバイス、電氣的・機械的にユニークな特性を有するチューブ半導体とそれを利用したメカニカル素子に共同研究を展開する。これらを通して半導体ナノエレクトロニクス分野をリードする革新的な三次元構造・三次元素子を確立する。

2. 研究・交流の方法

NTT、東北大、PDI が有する独自技術を利用して、新機能を有する三次元構造・素子を実現することを目指し、ウェハボンディングやバックゲートによる様々な三次元構造の作製、三次元構造による核スピン制御、チューブ半導体の伝導特性測定、チューブ半導体の電気機械素子への応用、高移動度フリースタンディング構造による電気機械素子の特性改善を目指して研究をスタートした。H20 年 3 月にベルリンでミーティングを開催し、各機関の独自技術を再確認し、PDI のヘテロ構造、チューブ構造試料を日本側で評価することから共同研究をスタートした。さらに、以後の交流に参加する研究者、学生を決定した。H20 年 9 月、12 月、さらに H21 年 1 月にも日独の研究者が会って、測定の進捗状況、ヘテロ構造の設計変更に関して意見交換した。この段階で薄いフリースタンディング構造で高移動度を得る PDI の構造ではゲートリークを抑制することが難しくなる問題点が浮上した。このため、高移動度二層系に関する研究は遅れたが、東北大での測定結果を PDI にフィードバックすることで、金属ゲート上へのヘテロ構造のウェハボンディング、二層構造における核スピン偏極度の層間拡散の測定に成功した。さらに、バックゲートによる電子系ドメイン構造の変調を利用した全電氣的核磁気共鳴技術（NMR に対し NER と呼ぶ）を確立した。

PDI が高い技術を持つチューブ半導体に関しては、NTT における予備実験を通して光による振動測定の重要さが認識され、H21 年 6-7 月に NTT 研究者が PDI に滞在し、光による測定を PDI で立ち上げた。さらにいくつかのチューブ構造を作製し、実験研究を PDI と NTT の双方で効率的に行える体制を整えた。これらの測定を通して、同じチューブ構造でも位置により異なる振動があり、振動状態は複雑であることがわかった。これを受けて、チューブ構造の振動モードを正確に評価することが不可欠となったことから、東北大でもチューブ半導体に重点をおくこととし、カーボンナノチューブの機械振動解析に実績のある東北大助教の泉田氏をメンバーに加え、チューブ半導体の振動解析を進めることとした。

これと並行して東北大の学生が H21 年 9-10 月 PDI を訪問し、チューブ半導体に並行な方向の磁場を加えた場合の磁気抵抗特性を測定すると共に、振動モードの理論解析を受け、ブリッジをたわませることで、振動状態を変調できる可能性を追求すべく、形状制御用金属ゲートを三次元的に配置したブリッジ構造の作製に着手した。その後、ウェハの改良、東北大でのプロセスを通してデバイスが完成しており、東日本大震災で遅れていた NTT での振動測定を H23 年 6 月に再開する予定である。

H22 年 2-4 月にはドイツ側研究者が来日し、ミーティングを行うと共に、合計で約 4 週間、NTT と東北大に滞在した。この滞在中に NTT ではチューブ半導体の振動モードに関する実験を進め、東北大では二軸回転機構を用いた低温実験を行った。後者は特にチューブ構造を

用いたジャイロスコープの発想の基となった。さらに、H22 年 8 月のミーティングを経て、チューブ半導体の共同研究を仕上げるため、H22 年 8-10 月に NTT 研究者が PDI を訪問し、チューブ構造を電氣的に励振する手法を確立した。H23 年 2-3 月には振動モードへの理解を深めるべく東北大学の研究者が PDI を訪問した。この訪問期間中に理論解析では予想されていたが実験では未確認であった低周波領域での振動が精密測定で実際に観測された。これらの成果は理論と実験を含めた共同論文を完成させ、チューブ構造を様々な電気機械素子に使う観点から極めて重要である。

なお、研究交流を促進し、さらに本プロジェクトにより得られた成果を効率的に外部にアピールするために期間中に以下の 4 つの国際シンポジウムを開催した。・AF3DCN2008^{*1}: 開催期間－H20. 3. 19、開催場所－ベルリン、参加者数－30 人、・ISNTT2009^{*2}: 開催期間－H21. 1. 20～23、開催場所－厚木、参加者数－200 人、・QNSP2010^{*3}: 開催期間－2010. 3. 9～11、開催場所－東京、参加者数－150 人、・AF3DCQS2010^{*4}: 開催期間－2010. 8. 30～31、開催場所－ポツダム、参加者数－30 人。日本での会議開催にあたっては他のJSTプロジェクトやNTTなどの研究機関と協力することでより効率的な会議運営に努めた。

*1 AF3DCN(Advanced Functionality with Three-Dimensionally Controlled Nanostructures)

*2 ISNTT(Int. Symp. Nanoscale Transport and Technology)

*3 QNSP(Int. Symp. Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena)

*4 AF3DCQS(Advanced Functionality with Three-Dimensionally Controlled Quantum Structures)

3. 研究・交流実施体制

3. 1 日本側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー) 平山 祥郎	東北大学	教授	博士	日本側全体総括
(研究者) 橋本 克之	東北大学	助教	博士	量子伝導計測、STM計測
(研究者) 泉田 渉	東北大学	助教	博士	振動モード解析
(研究者) 佐藤 健	東北大学	技術職員		ナノ構造作製
(学生) Mohammad Hamza h Fauzi	東北大学	大学院生		ブリッジ構造作製、量子伝導計測
(学生) 久米 航	東北大学	大学院生		量子伝導計測
(研究者) 山口 浩司	NTT物性科学基礎研究所	部長兼グループリーダー	博士	ナノ/マイクロメカニクス特性測定
(研究者) 岡本 創	NTT物性科学基礎研究所	研究員	博士	ナノ/マイクロメカニクス特性測定
(研究者) 小野満 恒二	NTT物性科学基礎研究所	研究員	博士	結晶成長、ナノ/マイクロメカニクス特性測定

3. 2 相手国側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー) K.-J. Friedland	ポール・ドルーデ研究所	研究員	博士	ドイツ側総括
(研究者) R. Hey	ポール・ドルーデ研究所	研究員	博士	三次元ナノ構造用結晶成長・構造作成
(研究者) A. Riedel	ポール・ドルーデ研究所	技術職員		三次元ナノ構造作製

4. 研究成果

4. 1 研究成果の自己評価

- ☐ 計画以上の成果がでた ☐ 計画通りの成果がでた
☒ 計画とは異なるが有益な成果がでた ☐ 計画ほどの成果はでなかった
☐ いずれでもない

4. 2 研究成果の自己評価の根拠

日本側は NTT が化合物半導体ヘテロ構造を用いた電気機械素子、東北大が高移動度ヘテロ構造を用いた物性測定、特に核スピンの半導体中での制御に向けた研究を行ってきたが、これに PDI の三次元あるいはフリースタンディング構造に向けたヘテロ構造作製技術やチューブ半導体を導入することで、一部当初の予定とは異なるが、相乗効果があり、高いインパクトを有する成果が多数得られた。以下に代表的なものを示す。

J1. PDI の薄膜高移動度ヘテロ構造をブリッジ部分に使うことで、NTT で進めてきた素子の特性が向上し、消費電力を著しく低減できる論理情報システムや超高感度センシング素子に役立つ可能性が示された。

J2. 電気機械素子に応用可能な三次元ナノ構造として PDI によって作製された半導体チューブ構造に注目し、その電気機械的特性を明らかにする実験を進めた。特に、光を用いた測定を確立し、チューブ構造の各場所における振動モードの精密測定に成功した。

J3. 半導体チューブ構造において PDI ならびに NTT で測定された固有振動がどのようなモードに対応するかを東北大で数値計算を行うことで明確にした。また、計算ではこれまでに測定されていなかった低振動数領域のモードの存在が指摘されたが、これは 2011 年 3 月に、PDI でなされた精密測定で確認された。

J4. 計算でわずかな形状のたわみがモードによっては大きな周波数変化に繋がることが分かり、これを実現すべく東北大が中心に 3 つの研究機関が協力して三次元的に金属電極を配置したブリッジ構造を試作した。

J5. GaAs 系ブリッジ構造に光を照射すると光励起キャリアによるピエゾ効果と機械振動が結合し全く新しい光による振動制御が可能であることを NTT が中心に示した。これに関連する成果では SSDM2010 の paper-award も受賞した。

J6. 三次元構造の知識を活かし、ゲート電界によりナノ構造の電子ドメインを振動させることにより核スピンを全電氣的に制御する新しい核スピン制御技術を東北大、NTT で確立した。

これはナノスケールの核スピン制御に道を拓く画期的なものである。

J7. PDI と東北大で金属細線上に高移動度ヘテロ構造をボンディングし、裏側の金属細線に加える電圧でヘテロ構造の輸送特性が制御できることを確認した。また、二層構造を用いた核スピンの相互拡散の測定に成功した。

一方、ドイツ側はチューブ半導体構造の作製技術、高移動度二次元系を含むチューブ半導体を得るために必要な高移動度フリースタンディング薄膜形成技術を有していた。これに NTT の化合物半導体メカニカル構造の研究、東北大の低温物性研究を組み合わせ、さらに東北大でのチューブ構造の振動モードの理論解析を利用することで、以下の成果を得た。

D1. 半導体マイクロチューブ構造の機械振動の電気的検出の研究を進め、特に NTT で進めていた Q 値が高い低温領域に測定を拡張することで、曲面に励起された微小電流による誘導磁場の検出に成功した。

D2. 曲面を有する構造の輸送モデルを発展させ、チューブ構造で観察された量子ホール効果を説明することに成功した。

D3. 東北大の振動モードの理論解析に基づき、チューブ構造の機械振動の電気的励振に成功した。これはチューブ構造の電気機械素子への応用に向けた大変重要な進展である。

D4. チューブ構造を利用したジャイロスコープを提案した。この画期的な提案はドイツ研究者が東北大訪問時に行った低温での二軸試料回転実験にヒントを得たものである。

4. 3 研究成果の補足

4.2 の J4 で述べた構造の振動特性に関して、光による測定を NTT で 2011 年 3 月に行うことを予定していたが、東日本大震災の影響で行えなかった。再トライを 6 月に行う予定であり、きちんとした結果が出れば年度は変わっているが日独共同研究の成果として発展させたい。

5. 交流成果

5. 1 交流成果の自己評価

- ☒ 計画以上の交流成果がでた ☐ 計画通りの交流成果がでた
- ☐ 計画ほどの交流が行われなかったが成果はでた
- ☐ 計画ほど交流成果がでなかった
- ☐ いずれでもない

5. 2 交流成果の自己評価の根拠

研究の進捗に不可欠で、今後の交流に繋がる人材交流が、当初の計画を超えて実現された。

・NTT 研究者の PDI 長期派遣（研究員 2 回、計 67 日間）：PDI が作製した半導体チューブ構造の機械振動を検出・評価するため微小機械振動子の測定技術を有する岡本氏が PDI を訪問し、共同実験を進めた。2 回目の訪問ではオンチップでのチューブ構造励振、振動検出、さらには周波数変調に成功し、本プロジェクト終了後も含めた共同研究を中核として進める足がかりが築かれた。1 回目の訪問は PDI での実験系の迅速な立ち上げにも大いに役立った。

・東北大学生、研究員の PDI 長期派遣（学生 31 日、研究員 41 日）：学生（Fauzi 氏）の訪問は、フリースタンディング構造の振動測定を勉強する格好の機会となり、新しい三次元機械構造の研究の出発点となった。チューブ構造の解析を進めてきた泉田助教の PDI 訪問は理論解析と実験のギャップを詰めるのに大変有用であり、東北大、PDI、NTT が共同で理論、実験の論文を仕上げる基礎が完成した。当初計画にはなかった機械構造の解析に関する共同研究は、相互に相補的であるため今後も積極的な交流が見込まれる。

・PDI 研究者の NTT、東北大長期派遣（研究員、計 34 日）：ドイツ側リーダーである Friedland 氏が NTT では主にチューブ半導体の振動実験、東北大ではチューブ半導体の磁場中での実験を進めた。また、チューブ半導体の振動モードに関しても議論した。東北大での実験はジャイロ素子の発想の原点となった。Friedland 氏はドイツ側で継続して研究交流を進めるための予算措置をはじめするなどプロジェクト後の交流の進展にも積極的である。ほぼ各年に日本、ドイツ（各 2 回ずつ）開催した国際会議は研究チームの成果アピール、メンバーが一堂に会した協議、当該分野の研究動向調査に極めて有効であった。

5. 3 交流成果の補足

特になし。

6. 主な論文発表・特許出願

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
論文	H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, “Vibration Amplification, Damping, and Self-Oscillations in Micromechanical Resonators Induced by Optomechanical Coupling through Carrier Excitation”, Phys. Rev. Lett. 106, 036801 (2011)	J1, J5 に 関 する 成 果
本(論 文)	Y. Hirayam “Contact Hyperfine Interactions in Semiconductor Heterostructures” Chapter 2.03, Pages 68-94 Comprehensive Semiconductor Science and Technology (2011, Elsevier)	J6の 成 果 を 含 む レ ビ ュ ー
国際会 議	H. Okamoto, H. Yamaguchi, W. Izumida, Y. Hirayama, R. Hey, and K.-J. Friedland “Nanomechanical resonances of rolled 2DEG structures”, International Conference on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (2010 QNSP, Tokyo)	J2, J3 , D1に 関 す る 成 果