

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	単電子・少数電荷制御によるシリコン低消費電力ナノデバイス
研究機関・部局・職名	NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・グループリーダー 主幹研究員
氏名	藤原 聡

【研究目的】

本研究の目的は、ナノメートルスケールのシリコンデバイスをベースとして、従来の電界効果トランジスタ (FET) では行うことのできない究極的な電荷操作を実現し、電子を1個ずつ転送、検出、機能利用する単電子・少数電荷制御デバイスの基礎技術を確立することにある。達成すべきマイルストーンは以下の通りである。

(1) 高速・高精度単電子転送技術

- ・単電子転送の精度評価を行い、動作速度 100MHz 以上、転送エラー率 10^{-8} 以下を実現する。
- ・転送精度最適化のための、動作条件、動作速度を明らかにする。
- ・LSI レベルのビットエラーを実現するエラー補償技術、デバイス・回路構成法を明らかにする。

(2) 単電子乱数の応用技術

- ・単電子のダイナミクスを解明し、乱数の質やその制御条件を明らかにする。
- ・単電子乱数により機能を発現し既存技術との比較によりそのメリットを数値的に明らかにする。

(3) 単電子・少数電荷の高感度・高速検出技術

- ・室温における電荷検出能 $10^{-4} e/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下を実現し、高感度化の最適条件を明らかにする。
- ・高速化のための駆動方法・最適条件を明らかにし、MHz 以上の動作速度を実現する。

(4) 光電子融合技術の開発

- ・SOI (Silicon-on-insulator) 基板上ナノデバイスの発光の機構、特に電界依存性、不純物効果、谷分離効果を明らかにし、それらの制御によりバルクシリコンに比べて発光効率1桁上の改善を実現する。

(5) 回路構成法検討

- ・上記の技術を組み合わせ、従来回路との比較で消費電力 1/10~1/100 の回路構成法を明らかにする。

【総合評価】	
	特に優れた成果が得られている
○	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
<p>単電子・少数電荷制御による革新的なシリコン低消費電力ナノデバイス開発に関して、目標とする5つの要素技術（単電子転送、単電子乱数、単電子検出、光電子融合、回路構成法検討）に関して、最初の4項目に関しては目標をほぼ達成し、また、想定以上の成果が得られた。最後の低消費電力デバイスの回路構成に関してはデバイス開発が追い付かず未達となったとはいえ、総合的に見て電子1個レベルの究極的な電荷制御・電荷検出のためのデバイス基礎技術の構築が大きく前進したと考えられる。</p> <p>今後、着実な実験の遂行に研究の進展に期待したい。また、関連して見出された、MOSFET 構造を利用する直接遷移発光の増強効果あるいは電界制御の可能性は新たな素子開発につながるものと期待されるため、更なる研究の展開を望む。</p>

② 目的の達成状況
<p>・所期の目的が <input type="checkbox"/>全て達成された ・ <input checked="" type="checkbox"/>一部達成された ・ <input type="checkbox"/>達成されなかった)</p> <p>目標とする5つの革新的要素技術（単電子転送、単電子乱数、単電子検出、光電子融合、回路構成法検討）に関しての成果を要約すると、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・単電子転送に関して、局在準位を介した電荷転送を積極的に利用した単電子転送の動作を実証し、GHz クロックでエラー10^{-8}以下を実現できる見通しを得た。また、作製した p 型デバイスを用いて 1GHz の高速単正孔転送を実現した。さらに、電子数の熱ゆらぎによるエラーを約 70%抑制できることを実験で確認した。 ・単電子乱数に関して、ナノデバイスを用いた確率共鳴デバイスの動作を確認し、デバイスの2個並列化によりセンサーとしての能力（入力出力の相関係数）が約 20%向上できることを確認した。 ・単電子検出に関し、ナノトランジスタに LC 共振器を組み込んだ RF-FET 技術により、室温動作で $2 \times 10^{-4} e / \sqrt{\text{Hz}}$、動作速度 20MHz を実現した。 ・光電子融合に関して、基板上ナノデバイスの発光機構を解明し、巨大谷分離のゲート電界制御により直接遷移成分の増強効果を確認し、バルク比 800 倍を実現した。 ・回路構成法検討に関して、低消費電力回路構成法を明らかにすることを目的として単電子エラーのフィードバック訂正の手法提案と実証を行ったが、回路構成法の提案までは至らなかった。 <p>以上、最後の項目で消費電力を従来回路との比較で 1/10~1/100 するという目標はデバイス開発が追い付かず未達に終わったが、他の項目についてはほぼ当初の目標を達成したと考える。</p>

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレイクスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

単電子デバイスのエラー率の絶対評価はこのデバイスの実用化を達成するには必須の技術であり、本研究がそれを実現し、その手法を用いて転送エラー率 10^{-4} が得られたことは高く評価できる。また、単電子転送を局在準位の利用により実現したことも、局在準位量を制御することにより転送効率を可変できるという新しい知見に繋がった。さらに、ノイズを利用して信号を検出する確率共鳴デバイスの実現、薄層シリコン MOS-FET 構造による発光ダイオード等、物性面からデバイスまで多くの先進性・優位性が見られる。また、間接遷移型とされる Si 材料を用いて薄層化した MOS-FET 構造を実現する事によりバルクタイプに比べて 800 倍という直接発光遷移が得られたことは、Si をベースとした電子デバイスと発光デバイスのハイブリット化が実現できることに繋がり、新しいブレイクスルー、イノベーションが実現するものと期待できる。当初の目的の他に得られた成果として、ノイズを逆手に利用した確率共鳴デバイスも特筆すべきものと考えられる。シリコン細線によるインパクトイオン化現象を利用することにより急峻スイッチを実現し、そのトランジスタ特有のヒステリシスとその確率的な振る舞いを利用することにより、1 種類のノイズでデバイス並列化による能力向上を実現した。高速・高精度単電子転送技術の一つとして、転送エラーの絶対評価に成功した点は先進的な成果であると言える。また、薄層シリコン MOSFET 構造を用いて発光ダイオードを作製して、直接遷移発光を増強できることを見出した点は先進的かつ優位性のある成果であると考えられる。

単電子トランジスタの新しい素子コンセプトとして、困難な挑戦が続いてきた単電子 FET 素子ではなく、単電子転送素子に注目して成果を絞っている点は注目に値し、特に、実際に単電子転送を行い、そのエラー率を測定した点は実験技術の開拓を含めて評価される。今後、これらの単電子転送素子が実現できる次世代デバイスを具体的に実現することを期待したい。

また、素子の作製技術や単電子検出技術は高いレベルで実現されており、これらの素地の上に実用デバイス実現に直接寄与できる画期的な成果を期待したい。

当初の目的の他に得られた成果である確率共鳴による SN 比の改善は、今後の低 SN 比動作を強いられるナノデバイス全般にとって有益と思われる。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

究極のナノデバイスは単電子で動作するトランジスタであることは周知の事実で

ある。しかし、その道筋は極めて厳しく、外乱による不安定動作に振り回されていた。それらの外乱を解析し、低減させることがこのデバイスの実用化に繋がるものと考えられ、本研究課題の成果は、単電子トランジスタの多くの課題を解決するのに役立つ。

単電子で動くトランジスタはデバイスから発する発熱も小さく、デバイス自体も超微細化可能で、市場性を考えれば超巨大メモリ、超微細高速動作 CPU など多くの展開が期待できる。本研究の成果は今後の日本の半導体の歩むべき姿を示唆しているものと考えられる。世界的レベルでの当該分野の進展はやや停滞しているのに対し、本研究課題の成果は、所望の目的に至らないとはいえ、着実かつ有効に研究活性化に寄与していると判断される。さらに、本研究課題の成果は、次世代の新規電子デバイス開発に対する有益な知見をもたらし、近い将来の社会的・経済的課題を解決に導くものと期待される。

単電子転送を実験で直接測定した学術的な価値は高い。また、 10^{-4} のエラーレート実証し、さらに 10^{-8} のエラーレート実現の見通しを得たことは十分にインパクトがある。乱数発生素子を含め単電子トランジスタ技術の新しい可能性を提示しており波及効果は高い。

本研究課題の成果により、次世代デバイスとしての単電子素子の技術的なポテンシャルをアピールし、引き続き社会や産業から期待されて発展していく技術であることを示して欲しい。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

研究員の転職があったが、共同研究の実施で対応し、また、研究員が新たに加わる等企業内での制約の中で適切にマネジメントされた体制のもと、良好に研究が実施された。

雑誌論文 17 (査読有 16 査読なし 1)、会議発表 37 (国際会議招待講演 2 を含む) で研究成果の公表は適切に行われた。企業としての知財公開方針によるものが特許であり、出願数 4 (取得済 0 出願中 4) である。諸外国に模倣されないためにも特許出願は必要である。国民との科学技術対話も適切に実施されたと考えられる。