

論文の内容の要旨

論文題目 Room-Temperature Operating Highly-Functional Silicon Single-Electron Devices
(室温動作高機能シリコン単電子デバイスに関する研究)

氏名 齋藤 真澄

過去 30 年間にわたり、MOSFET の微細化による大規模集積回路(VLSI)の高集積・高性能化が実現されてきた。最先端 MOSFET のゲート長は既に 50 nm を下回る領域に到達している。しかしデバイスサイズのスケージングの進行と共に、MOSFET の微細化を阻む様々な問題が顕在化しつつある。中でも消費電力の急激な増加は、今日のユビキタス時代において最も深刻な問題である。

本研究の目的は、極微細サイズにおいて性能が向上する新原理シリコンデバイスを既存の MOSFET と併用することによって、現在の VLSI 技術の限界を打ち破ることである。本研究では、2 種類の新原理ナノデバイス、シリコンナノクリスタルメモリ(メモリ応用)とシリコン単電子/単正孔トランジスタ (SET/SHT)(論理応用)について幅広く研究を行なう。この 2 種類のデバイスに極狭チャネル構造を導入することにより、性能及び機能性の著しい向上を図る。本研究は実際に作製したデバイスを用いた実証をベースとしており、実用の観点から室温での動作に焦点を当てる。

シリコンナノクリスタルメモリはゲート酸化膜中にナノクリスタルフローティングゲートを埋め込んだ MOSFET 型のメモリであり、既存のフラッシュメモリと比べてよりスケージングに適した、将来の不揮発性メモリの有力候補であると考えられている。本研究では、MOSFET チャネル構造の変更によるシリコンナノクリスタルメモリの性能向上(チャネル構造エンジニアリング)を提案する。作製した極狭細線チャネル(幅 10 nm 以下)ナノクリスタルメモリにおいて、古典的ボトルネック効果及び量子閉じ込め効果に起因する、巨大な閾値電圧シフト、長保持時間及び高速書き込みといった優れた性能を得ることに成功した。究極の単電子メモリの実現に向けての第一歩として、ドットからの単電子放出に起因した電流の階段状増加を幅 5 nm のチャネルを有するデバイスにおいて室温で明瞭に観測した。極狭細線チャネルナノクリスタルメモリのスケージングにおける課題及び将来展望について、主に特性ばらつきの観点から議論する。

SET は MOSFET における連続的なチャネルの代わりに 2 つのトンネル障壁で挟み込まれた 1 つの極微細ドットを有するデバイスであり、その動作は単電子の操作をベースとしている。シリコン SET/SHT は将来の超高集積・超低消費電力 LSI 回路の基本要素になることが期待されている。本研究では、シリコン SET/SHT の動作温度を著しく向上させる新作製手法を開発する。SET/SHT の構造としては、ウェットエッチング及び少量熱酸化で形成した極狭チャネル(幅 5 nm 以下)を有する MOSFET を用いる。チャネル形成プロセスの最適化及び p 型デバイス(SHT)の採用により、過去最高の電流山谷比(PVCR)(マルチドット型 SHT では 106、単一ドット型 SHT では 40.4)を有する巨大なクーロン振動を室温で観測した。

極狭チャンネルにおけるドットとトンネル障壁(SHT 構造)の形成メカニズムとしては、チャンネル幅/高さの揺らぎや酸化誘起歪みなどが考えられる。

室温動作 SET/SHT においては、極微細ドット中の巨大な量子準位間隔に起因する量子力学的効果が発現する。実際に作製した SET/SHT において、ドット中の離散的な量子準位を介した共鳴トンネリングによる負性微分コンダクタンス(NDC)を初めて室温で観測した。観測したNDCのPVCRは11.8と大きく、これは全ての平面型シリコン NDC デバイスの中で最高の値である。このように室温動作 SHT で観測された、ゲートで制御可能なNDCという新しい機能性を生かした、高機能論理及び柔軟なスタティックメモリを提案かつ実証する。クーロンブロッケード振動と NDC を組み合わせることにより、1 つの SHT だけで2入力の排他的論理和(XOR)演算を室温で実現した。この回路方式は論理回路中のデバイス数の大幅な削減を可能にするものである。また、1 枚のチップ上に作製した、NDC を示す SHT と負荷 MOSFET を接続することにより、0.2 V という低い電源電圧でのゲート制御可能なスタティックメモリ動作を室温で実証した。このスタティックメモリは非常に小型でかつ CMOS VLSI との整合性が高いという特徴も持つ。

集積 SHT 回路の実現のため、制御性の高い極狭細線チャンネル SHT の作製プロセスを開発する。作製したデバイスにおいて、1000 以上の PVCR を有する極めて巨大なクーロン振動を室温で観測した。単一のゲート下に作製した2つの SHT を用いた電流スイッチを初めて室温で動作させることに成功した。また、実用的な回路応用のために不可欠な技術として、SHT 及び直列狭チャンネル MOSFET 中に埋め込まれたナノクリスタルへの正孔注入によるクーロンブロッケード振動のピーク位置と電流の制御法を提案し、かつ室温で実証した。さらに、SHT 固有の特性を最大限に活用するため、埋め込みナノクリスタルを有する SHT を用いた超小型アナログパターンマッチング回路を提案する。提案したパターンマッチング回路の第一実証として、1枚のチップ上に作製した埋め込みナノクリスタルを有する3つの室温動作SHTを用いて、3成分ベクトル間の距離計算を行なった。