

審査の結果の要旨

氏名 伴野 直樹

近年、製品サイクルの短期化やユーザー用途の多様化から、市場では低コストかつ短時間で機能変更や強化が可能なシステム LSI (Large Scale Integration) が求められている。FPGA (Field Programmable Gate Array) に代表される再構成可能 LSI は、初期開発コストの低減や納期の短縮を実現できるが、配線切り替えスイッチのサイズが大きいという問題があり、さらなる高集積化の方法が求められている。イオン移動により作動する原子スイッチは低 ON 抵抗で小型化が可能という優れた特徴を有し、これを用いた再構成可能 LSI 開発に期待がかかっているが、その実用化には原子スイッチのデバイス信頼性という課題を解決する必要がある。本論文は、原子スイッチの基本的特性を支配する金属イオンの電気化学輸送現象の解析により、イオン伝導層中のイオン移動現象が ON 信頼性および OFF 信頼性を支配する主な要因であることを解明し、イオン移動特性の制御によるデバイス信頼性の確立を実現したものであり、以下の 6 章から構成される。

第 1 章では、再構成可能 LSI 開発の現状を概観し、この原子スイッチについてその作動原理を述べると共に、その再構成可能 LSI への応用における信頼性に関わる課題を抽出し、高 ON 電圧化、多層配線プロセスに対する熱耐性、ON 信頼性ならびに OFF 信頼性であることを指摘している。

第 2 章では、原子スイッチの高 ON 電圧化について検討を加えている。イオン伝導層に Cu_2S を用いた原子スイッチの ON 電圧は LSI 動作電圧より低いため、ロジック信号でスイッチが誤作動するという問題がある。原子スイッチの ON 状態への遷移は、金属イオン生成、電解質中のイオンの移動、Cu 架橋析出という 3 つの電気化学的過程を経て行われるが、イオン伝導層中での Cu^+ イオンの移動 (拡散) 速度が ON 電圧を支配している主な因子であることを実験的に明らかにした。また 45~25nm 世代 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 動作電圧である 0.9V の ON 電圧を得るためには、 Cu_2S よりも十数桁小さい銅イオン拡散係数を有する酸化物系電解質が必要であり、なかでも多層配線を形成する後工程 (BEOL: Back End Of Line) プロセスと親和性のある $\alpha\text{-Ta}_2\text{O}_5$ が有望と判断してデバイス特性の検討を行い、0.9V 以上の ON 電圧が達成できること、スイッチング速度および繰り返し耐性も必要とされる仕様を満足することを示

した。

第3章では、BEOLプロセスの熱負荷に対する原子スイッチの信頼性（熱耐性）について検討を加えている。再構成可能LSIへの応用では、原子スイッチを多層配線層中に形成することを想定しているため、BEOLプロセスの加熱工程に対する熱耐性が必要となる。 $a\text{-Ta}_2\text{O}_5$ をイオン伝導層に用いた原子スイッチでは、BEOLプロセス中にCuが $a\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 層中に拡散して上下電極が短絡する故障が発生する。加熱過程における $a\text{-Ta}_2\text{O}_5$ の熱劣化現象は酸素の脱離による構造変化に大きな影響を受けること、ならびに、これが SiO_2 の添加によって抑制されることを見いだした。この SiO_2 添加による Cu^+ イオンの拡散抑制効果を利用して、原子スイッチの熱耐性向上を実現した。

第4章では、ON信頼性、すなわちON状態を担うCu架橋のロジック信号電流に対する耐性について、原子スイッチを多層配線中に集積したクロスバースイッチを形成して検討を加えた。まずDCストレス電流下でON状態の電流耐性を調べ、信号電流に対するON保持時間予測式を導出し、原子スイッチのON信頼性の評価基準を確立した。次に再構成可能LSIの配線切り替えスイッチに流れるパルスAC電流に対するON信頼性を評価し、ON信頼性とOFF遷移に必要な電流（OFF電流）のトレードオフ関係を明らかにした上で、許容可能なOFF遷移電流の範囲内でON遷移が可能なON抵抗の条件を示した。

第5章では、OFF信頼性、すなわちOFF状態がロジック信号の電圧によって変化する問題について検討している。ON状態へ短時間で遷移し、かつOFF状態を10年以上保持するためには、印加電圧に対するON遷移時間の依存性が急峻でなければならない。多層配線中に原子スイッチを集積する場合、Cu電極と電解質層の間にプロセス中のCu電極の酸化を抑制する酸化防止膜を形成するが、これに用いる酸化物の熱力学的安定性がON状態への遷移時間の電圧依存性に影響を及ぼすことを明らかにした。高OFF信頼性のためには、安定な酸化物材料を用いること、ならびに厚膜化によるプロセス中のCu電極の酸化抑制が有効であることを見だし、OFF保持時間10年を確保しつつ $100\ \mu\text{s}$ 以下という短時間でのON遷移を実現した。

第6章では、以上の成果を総括するとともに、この新しい原子スイッチの原理に基づく再構成可能LSIの将来展望を述べている。

以上のように、本論文は原子スイッチの再構成可能LSIの配線切り換えスイッチへの応用において、原子スイッチの特性を固体電気化学的に解析し、その結果をもとにしてデバイス信頼性に関する諸問題を解決したものであり、ナノエレクトロニクスデバイスにおける材料化学の重要性を示したという点でマテリアル工学に対する貢献は大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。