

## 論文の内容の要旨

論文題目 原子移動型スイッチデバイスの  
信頼性に関する研究

氏 名 伴野 直樹

本論文は、イオン伝導体内部で起こる金属架橋の析出・溶解を利用したスイッチ、「原子スイッチ」の、スイッチング現象における金属イオンの拡散の影響を明らかにするとともに、本スイッチを再構成可能 LSI (Large Scale Integration) の配線切り替えスイッチに応用するために必要な信頼性の確保を金属イオン拡散の制御を通して行うことを目的とする。そのため、原子スイッチは LSI の多層配線中に埋め込む構造を提案し、金属架橋を形成する金属として、多層配線を構成する Cu を用いることとした。

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期間で機能変更や強化が可能なシステム LSI が求められている。しかし、従来の LSI の微細化ではコストが高く、開発期間も長いため、このような要求に答えるのは難しい。FPGA (Field Programmable Gate Array) に代表される再構成可能 LSI は、ロジックセル間を繋ぐ配線をスイッチによって用途別の LSI を構成できるため、初期開発コストの低減や納期の短縮を実現できる。しかし、従来の再構成可能 LSI は配線切り替えスイッチのサイズが大きいため、チップコストが高く、性能が低くなってしまう問題がある。イオン伝導体内において、電流経路となる金属架橋が析出・溶解することでスイッチング動作する原子スイッチは、低抵抗かつ小型化可能という特長から、再構成可能 LSI の配線切り換えスイッチの応用が期待されている。本スイッチを用いた再構成可能 LSI は、従来の FPGA が持つ課題を解決できる。しかし、原子スイッチを実用化するためには、信頼性に課題があった。

まず、1つ目の課題は原子スイッチの ON 電圧の向上である。イオン伝導層に  $\text{Cu}_2\text{S}$  を用いた原子スイッチ LSI 動作電圧より低いため、ロジック信号でスイッチの ON および OFF 状態が変化してしまうという課題があった。そのため、ON 電圧の高電圧化が必要であった。原子スイッチの ON への遷移は、金属イオンの生成過程、イオン伝導層内における金属イオンの移動過程、Cu 架橋の析出過程の3つの過程を経て行われている。そのため、高 ON 電圧化は、これらの過程を抑制することで達成できると考えた。第2章では、イオン伝導層中での  $\text{Cu}^+$  イオンの移動速度 (拡散係数) と ON 電圧の関係を調べることで、高 ON 電圧化の方策を考察した。ON 電圧と  $\text{Cu}^+$  イオンの移動速度の関係は、それぞれの温度依存性を低

温環境下で測定し、両者を比較することで求めた。この結果、再構成可能 LSI の応用に必要な CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) の動作電圧である 0.9V のスイッチング電圧を得るためには、Cu<sub>2</sub>S よりも数十桁小さい銅イオンの拡散係数を有するイオン伝導層が必要であり、酸化物系イオン伝導体が有望であることがわかった。そこで、イオン伝導層には、多層配線を形成する後工程 (Back End Of Line : BEOL) プロセスと親和性のある材料である Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を選んだところ、ON 電圧は 0.9V 以上を達成した。観測された抵抗変化が金属架橋の形成に起因するものか、ON 状態の電子顕微鏡観察と元素分析を行った結果、Cu 架橋の形成が確認された。さらに、スイッチ速度および繰り返し耐性試験を行ったところ、再構成可能 LSI の適用基準を満たすことがわかった。

次の課題は、BEOL プロセスの熱負荷に対する原子スイッチの信頼性である。本論文では原子スイッチを多層配線層中に形成することを目的としている。このため、原子スイッチには BEOL プロセスの加熱工程に対する耐性が必要となる。しかし、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> をイオン伝導層に用いた原子スイッチでは、BEOL プロセスの加熱工程において Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> が劣化し、Cu<sup>+</sup>イオンの拡散速度が速くなる。このため、BEOL プロセス中に Cu が Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 内に拡散し、上下電極が短絡する故障が発生する可能性がある。そこで、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> に SiO<sub>2</sub> を添加することで、高温環境下における Cu<sup>+</sup>イオンの拡散速度を抑制した。この結果、再構成可能 LSI の BEOL プロセスにおける熱負荷に対して、信頼性を確保できた。さらに、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の熱劣化機構と SiO<sub>2</sub> 添加による効果について分析を行った。その結果、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の熱劣化は加熱過程における酸素の脱離に起因しており、SiO<sub>2</sub> の添加によって酸素の脱離が抑制されていることがわかった。

さらに、ON 状態および OFF 状態の保持にも課題を有する。原子スイッチを再構成可能 LSI の配線切り換えスイッチに応用するためには、ON 状態を担う Cu 架橋がロジック信号の電流によって切断してはならない。本論文では、まず DC ストレス電流下で ON 状態の電流耐性を調べ、印加電流に対する ON 保持時間予測式を導出し、原子スイッチの信頼性の評価基準を確立した。続いて、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 電流に対して、ON 信頼性を評価し、信頼性と OFF に遷移する際に必要な電流 (OFF 電流) のトレードオフ関係を明らかにした上で、信頼性が保証可能で OFF 電流が再構成可能 LSI に許容可能な ON 抵抗を示した。パルス AC 電流による ON 信頼性の実験は、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測定を行った。また、OFF 状態の信頼性についても調べた。原子スイッチの OFF 状態は、再構成可能 LSI の動作時におけるロジック信号の電圧が印加されてもスイッチの状態を保持しなければならない。しかし、一方で、ON への遷移時は出来るだけ低い電圧で短時間スイッチする必要がある。ON へ短時間で遷移し、OFF 状態を保持する場面では 10 年以上状態が遷移しないためには、印加電圧に対する遷移時間の依存性が急峻となっている必要がある。本論文では、OFF から ON への遷移時間の電圧依存性を調べた。多層配線中に原子スイッチを集積する場合、Cu 電極とイオン伝導層の間に Cu 電極の酸化を抑制する酸化防止膜を形成するが、この酸

化防止膜が ON への遷移時間の電圧依存性に影響を及ぼすことがわかった。高 OFF 信頼性を得るには、標準ギブズエネルギーの高い酸化防止層材料を用いるか、酸化防止層を厚膜化し、Cu<sup>+</sup>イオンの生成を促進する Cu 電極の酸化を防ぐことが望ましい。この結果、10 年の OFF 保持時間が得られる素子において、OFF 状態の保持時とスイッチング時の OFF から ON への遷移時間の差が 15 桁以上得られる結果が得られた。

以上のように、本論文では、再構成可能 LSI の配線切り換えスイッチへ適用に対して原子スイッチが有する課題を解決した。この結果より、原子スイッチの素子性能が向上し、原子スイッチを搭載した再構成可能 LSI の実用化の可能性を示した。