

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 韋 瀟 竹

本論文は 6 章からなり、溶液処理された p 型有機半導体膜 (OSC) と n 型金属酸化膜半導体 (MOS) を用いて、高い動作速度と優れた柔軟性によりスケーラブルな相補型トランジスタ集積回路を実現する技術を、溶液プロセスの開発に焦点を当てて研究している。

第 1 章では、この研究の背景として、プリンテッドエレクトロニクスが、次世代のエレクトロニクス、特にフレキシブルエレクトロニクスを実現するための有望な低コスト技術であることと現状での課題を述べている。現在、p 型および n 型半導体に関して、溶液プロセスで製作できる同程度に高性能な半導体材料がないことに注目し、p 型 OSC と n 型 MOS を組み合わせたハイブリッド相補回路を提案した。

第 2 章では、薄膜トランジスタの性能を評価するための動作原理、電荷輸送、およびパラメータ抽出を含む、トランジスタ技術の一般的な紹介を行った。また、相補型回路の基本素子であるインバータについて、機能と動作原理を述べている。さらに、MOS と OSC に焦点をあてて、従来行われてきた研究をベースに、回路動作に関して、詳細な理論的背景を示した。

第 3 章では、半導体材料を構成する元素の組成、アニーリング温度、チャネル層の厚さを最適にすることは、高速で柔軟なスケーラブル相補回路を得る目的に対して、いずれも不可欠であることを明らかにし、高移動度、低温での素子作製技術、および高い均一性を同時に実現する手法を工夫している。半導体の電子伝導チャネル用材料として、より一般的に知られているインジウム-ガリウム-酸化亜鉛 (IGZO) の代わりに三元インジウム-酸化亜鉛 (IZO) を使用して、キャリア移動度が大幅に向上した。また、アニーリング温度とチャネル層の厚さを制御することにより、キャリア輸送経路、キャリア濃度、および電子トラップ密度を精密に制御して、高移動度を有し、ゲート電圧ゼロ付近でスイッチする望ましいトランジスタ性能を実現している。

第 4 章では、溶液プロセスを用いた MOS の集積回路化に向けて、半導体にダメージを与えないリソグラフィプロセスについて記述している。新たに開発された、低温で化学的にマイルドな条件でプロセスできるレジストと現像液を使用して、IZO および Al のソース電極とドレイン電極の化学的損傷を抑制することに成功している。この方法により、チャネル長が $1.7\mu\text{m}$ まで短くできることも示され、カットオフ周波数 (f_t) は 23 MHz に達し、これまでに報告された溶液プロセスによる n チャネルトランジスタの中で最も高い値を得た。その結果は、高速集積回路における IZO ベースのトランジスタの可能性を証明した。さらに、PMMA/パリレン/ AlOx ハイブリッドパッシベーションの手法を見出し、上部層に p 型 OSC を形成するた

めに必須のパッシベーション層を得ることに成功した。

第 5 章では、集積回路化に向けて、スケーラブルな製造と高速動作に向けた p 型 OSC とのハイブリッド相補回路の作製プロセスについて述べている。高性能有機半導体材料として、3,11-ジノニルジナフト[2,3-d:2',3'-d']ベンゾ[1,2-b:4,5-b']ジチオフェン (C9-DNBDT-NW) の単結晶薄膜を採用し、第 4 章で見出した層間パッシベーションの手法を用いて、ハイブリッド相補回路の作製が可能となった。得られたハイブリッド相補型インバーターは、大気に 5 か月間機能する耐久性を有することも明らかにしている。さらに、曲げ歪を加える実験においても高い安定性を示した。さらに、1 段あたり $1.3\ \mu\text{s}$ の伝搬遅延を持つ 5 段リングオシレータを作製し、ソリューション処理されたフレキシブル相補型インバータでこれまでに報告された中で最速の動作スピードを実現することにも成功した。

第 6 章では、本研究のまとめと将来展望について述べている。論文で論じたハイブリッドシステムに基づく柔軟な相補回路を印刷する技術は、現時点で溶液プロセスを用いて作製可能な最も高性能の相補型集積回路技術と位置づけられ、IoT 社会の高度で大量の情報処理を実現するための費用対効果の高い方法であると結論付けている。

なお、本研究の立案から半導体材料の最適化研究、集積回路化研究に至る一連の研究成果は、提出者本人が主体となって行った結果である。成果の一部は、熊谷翔平、山村祥史、都竹康太郎、牧田龍幸、佐々木真理、渡邊峻一郎、竹谷純一との共同研究であるが、実験、解析、解釈の全てを提出者本人が主体となり行っており、十分な寄与があったと言える。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1 9 2 1 字