

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	大島 國弘
論文題目	Leakage-Current-Aware Layout Design of DNTT-Based OTFTs and Its Applications to Digital Circuits (DNTTを用いる有機薄膜トランジスタのリーク電流考慮レイアウト設計とそのデジタル回路への応用)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>有機薄膜トランジスタ (OTFT) は、低コストかつ低温の製造プロセスを用いてプラスチック等の柔軟な基板上に作製可能であることから、センサ等、様々な電子システムへの応用が期待されている。特に、p型有機半導体であるジナフト[2, 3-b:2', 3'-f]チエノ [3, 2'-b]チオフェン (DNTT) は、キャリア移動度が高く大気中での安定性にも優れる特長がある。本論文では、DNTTを用いて作製する低電圧OTFTが、素子材料の層間接触に依存して様々なリーク電流を示すことを見出し、実験を通じてその性質を解明している。また、層間接触が異なる複数のレイアウト設計を示し、リーク電流を制御する方法を提案している。これらの新たなOTFTレイアウト設計を応用して、高い機能と安定な動作を両立するOTFT回路を提案している。</p> <p>本論文は、以下の6章で構成される。</p> <p>第1章は序論である。本研究の背景として、フレキシブル電子システムにおける有機半導体とOTFTの研究動向を概観している。DNTTを用いたOTFTにおけるリーク電流制御の必要性とOTFTの回路応用の重要性を明らかにしつつ、本研究の目的と提案手法の概要を示している。</p> <p>第2章では、本論文において研究の対象とする、DNTTを用いるボトムゲート型のOTFTの詳細について、他のOTFTデバイスとも比較しつつ、素子構造、動作原理、材料、および製造プロセスを説明している。</p> <p>第3章では、リーク電流の原因となるデバイス構造の特定に焦点を当て、3種のOTFTレイアウトを定義している。各レイアウトは、ゲートリーク電流の相対的な増大、有機半導体面内のソースドレイン電極間リーク電流の相対的な増大、およびリーク電流の低減による高いオン-オフ電流比の実現、というそれぞれのレイアウトに特徴的な特性を示す。さらに、ソースドレインリーク電流の経路を実験的に明らかとし、レイアウト構造を考慮したリーク電流モデルを提案している。提案した複数のレイアウトを組み合わせることで、回路の動作安定性を向上できることを、試作と測定を通じ示している。</p> <p>第4章では、リーク電流考慮レイアウトを用いるOTFTの回路応用として、OTFT回路に向けたスパイクングニューラルネットワークflex-SNNを提案している。flex-SNNは、センサ近傍でのデータ処理を実現することで、フレキシブル電子システムにおける通信コストの低減を狙う。Flex-SNNのアーキテクチャは、入力層、興奮性ニューロン層、入力層-興奮性ニューロン層間を全接続するシナプスマトリクスから成る。シナプスは、OTFTを構成する絶縁膜層とコンタクト層を用いて金属配線の交差部に形成するため、省面積かつスケラブルである。回路シミュレーションによりFlex-SNNの性能を評価し、MNISTデータセットにおける"0"と"1"の画像分類を、97%の精度で実現できることを示している。</p> <p>第5章では、フレキシブル電子システムにおける安全な認証機能の実現に向けて、リーク電流考慮レイアウトを活用した物理複製困難関数 (PUF) 回路の設計を示している。提案する回路では、金属酸化物薄膜で構成する新たな抵抗変化型ランダムアクセスメモリ (ReRAM) 素子を提案し用いている。このReRAM素子は、金属酸化物薄膜への電圧印加により、デジタル値の書込みと保存が可能であり、OTFT絶縁膜と共通の材料及び構造で作製できる特長がある。また、OTFTの特性劣化に依存して出力応答が変</p>			

動しやすい既存のOTFT PUFと比較して、長期間にわたり安定した応答データの保持を実現している。さらに、ReRAM素子へのデータ保存により、製造段階において応答データを共有・複製するPUF回路であるクローナブルPUFが実現できることを示している。測定とシミュレーションを組み合わせた評価により、提案するReRAM及びクローナブルPUFが正常に動作することを検証している。

第6章では本論文で得られた成果についてまとめるとともに、今後の展望や課題について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ジナフト[2, 3-b:2', 3'-f]チエノ[3, 2'-b]チオフェン (DNFT) を有機半導体として用いる低電圧バックゲート型有機薄膜トランジスタ (以下、低電圧OTFT) を対象とする。低電圧OTFTでは、レイアウト設計に依存してリーク電流が大きく異なる。この現象に着目し、実験を通じてリーク電流の経路と特性を明らかとするとともに、リーク電流の制御を可能とするレイアウト設計手法を提案している。リーク電流モデルをOTFTのシミュレーションモデル式に組み込むとともに、提案した複数のレイアウトを使い分けることで、低電圧OTFTを用いるデジタル回路の性能向上と安定性向上を両立させる設計手法について論じている。本論文で得られた主な成果は、以下のように要約できる。

1. 低電圧OTFTのレイアウト端部におけるゲート電極とゲート絶縁膜、DNFT、およびソース・ドレイン電極の各薄膜層の接触の有無により、OTFTのリーク電流が一貫性を持って変化することを見出し、リーク電流の経路を特定してモデル化を行った。半導体であるDNFTがゲートバイアス非印加でもわずかに電流を流すこと、および電極との接触によりショットキーダイオードに似た特性を示すことを実験的に示し、従来は明らかでなかったゲート電極とDNFTとの相対的な被覆関係に関するレイアウト指針を、リーク電流制御の観点から与えた。
2. レイアウト設計により異なる層間接触を持つOTFTの回路応用として、低電圧OTFT向けのスパイクニューラルネットワークflex-SNNを提案した。flex-SNNは、入力層、興奮性ニューロン層、入力層-興奮性ニューロン層間を全接続するシナプスマトリクスから構成され、シナプスはOTFTの絶縁体層とコンタクト層を用いて金属配線の交差部に小面積で形成している。測定に基づくシミュレーションにより、flex-SNNは、MNISTデータセット中の”0”と”1”の画像分類を97%の精度で行えることを示した。
3. センサ等により取得したデータのセキュリティ向上に資する、有機トランジスタを用いる物理的複製困難関数 (PUF) 回路を提案した。スタティック・ランダムアクセスメモリのビットセル回路をエントロピー源としてランダムな応答を生成し、金属酸化物薄膜で構成する新たな抵抗変化型ランダムアクセスメモリ素子に格納する。この構造は、既存の低電圧OTFTの材料や製造プロセスを変えずに製造できるだけでなく、応答を共有するPUFの集合であるクローナブルPUFを作成できる。素子特性の経時変化のもと、4ヶ月以上の長期間にわたり安定した出力応答が得られることを、試作を通じて示した。

以上、本論文では、DNFTを半導体とする低電圧OTFTの応用を拡大する新たなレイアウト構造を与え、OTFTを用いる新たなデータ処理システムや、データのセキュリティを向上するPUF回路に適用して、その有効性を示している。提案した回路はいずれも、試作と測定、および測定結果に基づくシミュレーションを通じた検証を行っており実用上の価値も高い。本論文の内容は、学術上、応用上ともに関連する分野の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士 (情報学) の学位論文として価値あるものとして認める。また、令和6年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。