

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 Yi-Lin Wu (イーリン・ウー)

有機イメージセンサは、感光層またはデバイスに有機材料を利用する新しいタイプのデバイスである。優れた吸収性および感度、低温および大面積プロセス適合性、ならびにそれらの機構の柔軟性のために、有機イメージセンサは、ウェアラブル医療用デバイスへの応用が期待されている。有機イメージセンサの中でも、ダイオードスタックの画素構造を有するものが注目されている。このイメージセンサは有機光検出器とスイッチング部品を垂直に積み重ねた 2 端子構造を有している。このイメージセンサの製造は単純であり、画素内に追加の電子部品を必要としない。このため、高解像度の有機イメージセンサに適した構造である。しかしながら、ダイオード積層型有機イメージセンサには、個々のピクセルが 0V でオフにできないため、待機電力が高いという課題などがあつた。この論文では、ダイオード積層画素を用いた有機イメージセンサの感度向上を目指している。

第 1 章は序章である。ダイオード積層画素を有する有機イメージセンサである論文のトピックが紹介された。それを踏まえ本論文で議論されるトピックを定義した。

第 2 章では、有機イメージセンサの基礎と背景知識を紹介した。最初に、有機イメージセンサを開発する動機について述べた。次に、有機イメージセンサの最も重要な構成要素である有機光検出器を紹介した。これまでの論文で議論された有機フォトダイオードと有機光電子増倍型光検出器を解説した。また、今日までに導入されている様々なタイプの有機画像センサ、特に、ダイオード積層型有機イメージセンサについて詳しく述べた。さらに、有機イメージセンサの用途について説明した。

第 3 章では、実験材料と方法が紹介されている。本論文の有機イメージセンサで使用された材料、製造方法、および特性評価方法を含む。

第 4 章では、ダイオード積層ピクセルのオン電圧をコントロールすることによって、有機イメージセンサの消費電力を低減する研究が報告されている。モノリシックおよび垂直方向に積層された 2 端子有機フォトダイオード素子ダイオード画素に基づく有機画像センサは、画素構造がシンプルであるという利点がある。ただし、個々のピクセルを 0 V でオフにすることはできなかったため、より高い静的電力が必要となっていた。実際に、従来のダイオードスタック型ピクセルでは、ピクセルをオフにするために 0.5V を印可する必要があつた。ウェアラブルイメージセンサーは低電力動作と読み出し回路の複雑さの軽減を必要とするため、個々のピクセルを 0 V でオフにできるようにすることで有機イメージセンサの電力を削減することが重要である。本章では、ダイオード積層ピクセルの低電力化について述べた。より具体的には、感光特性を変えずにターンオン電圧を変調することによって低電力化を実現している。ノーマリーオフ特性は、ブロッ

キングダイオード側の電極の仕事関数を設計することによって達成された。これにより、ターンオン電圧が正から負にシフトし、0 V でフォトダイオードからの光電流が遮断された。0V での電流が約 3 桁減少したため、0 V でイメージャはオフになり、待機電力が削減された。異なる仕事関数を有する有機ブロッキングダイオードにおける電圧シフトもまた実証された。これらを用いて、ノーマリーオフモノリシック積層有機フォトダイオードブロッキングダイオードピクセルに基づく当社の有機イメージセンサを使用した低電力イメージングを実証した。クロストークを劇的に減少させることができ、そして画像品質の明／暗比を高めることができた。

第 5 章では、光電子増倍管によって、ダイオード積層型有機イメージセンサの感度を向上する研究が報告されている。ダイオード積層ピクセル有機画像センサは単純な構造を有するが、応答は有機フォトダイオード構成要素によって制限されるので、高感度化の手法を確立する必要がある。有機フォトダイオードは光起電力効果を利用しており、これは1つの光子が1つの電子を生成することを利用している。従って、電子対光子比は 100% に制限される。構造が簡単なため、画素内アンプを挿入することが困難である。画素内増幅器を追加すると、ダイオード積層画素構造の単純な構造が破壊される。本章では、ダイオード積層有機イメージセンサの高感度化を実現するために、ダイオードスタック内の有機光電子増倍型光検出器を活用した。有機光検出器は、反転構造、活性層中の 100:1 のドナー・アクセプター重量比、および光増倍を伴う低暗電流と高光電流応答との間で切り替えるための最適化されたボトムコンタクトによって最適化した。光検出器は、オン／オフ比を改善するためにブロッキングダイオードとともに積層された。有機光電子増倍型光検出器の性能に及ぼすデバイス分極、ドナー・アクセプター比、コンタクト材料と仕事関数、そして整流ダイオード層の影響を調べた。その結果、フォトディテクタピクセルは、40 A/W を超える高い応答性、低い暗電流 ($2.53 \times 10^{-4} \text{ mAcm}^{-2}$)、および高いオン/オフ比 ($100 \mu \text{ Wcm}^{-2}$ で 1.59×10^4) を実現した。これにより、ダイオード積層型有機イメージセンサは、 $1 \mu \text{ Wcm}^{-2}$ という微弱な光強度レベルで、低い光イメージング能力で高い電流応答を示す。

第 6 章は、まとめと展望である。

以上を要するに、本研究では、ウェアラブル医療用イメージセンサとして期待される有機イメージセンサの高性能化を目指して、界面制御でオン電圧を補正することによってダイオードを積層した有機イメージセンサの消費電力を低減し、光電子増倍管効果によって有機イメージセンサの感度を向上し、低消費電力と高感度を両立したフレキシブルイメージセンサを実現することによって有機エレクトロニクス of the 新しき可能性示したもので、電子工学における貢献は大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格であると認められる。