

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 尾崎 俊文

本論文は「固体撮像素子の高精細化に関する研究」と題し、2次元固体撮像素子の高性能化に関する研究をまとめたものである。2次元固体撮像素子は、民生用ビデオカメラでの利用のために大量に生産されてきたが、次世代の超高精細映像システムに応用するためには、低雑音化、高速低消費電力化、高密度化など、固体撮像素子性能の抜本的な向上が必要であった。本研究において、論文提出者は撮像デバイスの基礎研究に基づく雑音と消費電力の低減に加え、微弱な電荷を増幅・転送する新しい回路方式の考案によって、超高精細映像システムに必要な条件を満たす新しい固体撮像素子技術を確立した。

論文は6章から成っている。

第1章は序論であり、本研究の背景となる固体撮像素子の技術史を概説し、高精細映像システムを実現するための条件の精査、具体的な目標設定および本論文の構成について述べている。

第2章は、「2次元固体撮像素子の低雑音化」と題し、従来考慮されていなかったMOSFETの $1/f$ 雑音を考慮した雑音のモデル化と最適化について述べている。バケットブリゲード転送過程における雑音解析において、転送電荷量のゆらぎを記述する方程式に雑音を電圧源として取り込むことで、 $1/f$ 雑音を含む新しい解析式を導出している。この解析式により、従来の雑音モデルでは説明できなかったデバイスパラメータの影響を説明できることを示した。さらに、本モデルに基づいた最適化の解析から、反転増幅回路を付加すると、緩和効果が強まり、従来の理論的下限以下の雑音を得られる事を実証した。また、増幅器出力をサンプリングした時の雑音を、相関関数を用い $1/f$ 雑音を考慮しモデル化し、各列毎に相関2重サンプリング回路を設けた列並列差動方式の雑音を検討した。この解析から、低雑音化には $1/f$ 雑音の小さなMOSFETの使用が不可欠であるという重要な知見を導きだしている。さらに、筆者は、 n チャネルMOSFETの $1/f$ 雑音電力密度が、 $n+$ 拡散層形成のための砒素打ち込み時にフッ素イオンを打ち込むことにより、界面に近い酸化膜中の電子トラップを減少させ、雑音電力の1桁以上の低減につながることを見出している。本研究で提案された列並列差動方式は、現在、CMOS画素増幅素子に広く適用されている。

第3章は、「2次元固体撮像素子の低消費電力化」と題し、CCDの高速低消費電力化を目的としたデバイス構造の最適化について述べている。2次元電位解析により、過剰電荷排出用の n ウェルの濃度を増加すると、CCD直下のウェルが完全に空乏化し、電極下電位勾配の最小値を示す最小フリンジ電界が約1ケタ以上大きくなり、電極下空乏層幅が無限大時の理論限界値に達することを見出している。しかも、ウェル空乏化時に、単位面積当たりの転送容量は変化せず、スミアと言われる偽信号の増加もないという従来の手法の短所

を解決する特質を有することも示された。また、CCD チャネル層の高濃度化により、98nm の重ね合わせ電極間隙部にも電位ウェルが発生し、転送効率が劣化することを明らかにしている。

第4章は、「2次元固体撮像素子の高密度化」と題し、低照度撮像時の画質劣化要因となる暗電流の低減を目的とした界面不活性化技術について述べている。筆者は、撮像素子の暗電流が、界面の空乏化を防止することによる生成再結合中心の不活性化により減少することに着目し、フォトダイオード n 層を全て半導体基板内に埋め込むことにより、低暗電流を実現している。さらに、埋め込み化により従来の表面電界効果による信号読出しは不可能となるが、パンチスルー効果による信号読み出しがこの構造では可能であることを見出すことによって、低暗電流特性と高飽和信号電荷量を両立する撮像素子の開発に成功している。このデバイス構造は現在、CCD 型撮像素子に広く利用されている。

第5章は、「列並列差動列増幅方式多重電位井戸転送 CCD 型撮像素子」と題し、前章までの結果を総合した超高精細撮像システムの第1ステップ用素子の基本設計、プロセス、素子特性について述べている。本素子では、垂直 CCD 列毎に設けた列増幅器に列並列差動方式を適用し、雑音と消費電力を低減している。さらに、各画素にはパンチスルー効果を利用した界面不活性化技術を適用し、ウェル空乏化により垂直 CCD を高速化し画素を縮小することを可能としている。

第6章は、本研究の成果の要約と目標の達成度に関する考察である。

以上を要約すると、本研究は、低雑音、高速低消費電力、低暗電流高密度という高精細化に必要な特長を備えた新たな固体撮像素子の実現を目指して、撮像デバイスにおける雑音解析、デバイス構造の最適化、暗電流低減および高速電荷転送を実現する回路方式の提案など多岐にわたる研究開発を行った成果であり、超高精細映像システムの実現に大きな寄与があったと評価できる。また、これらの研究成果は、超高精細撮像システムへの利用に留まらず、光計測分野での微弱光を高速かつ高空間分解能で撮像する技術一般にも寄与するものであり、物理工学としての貢献が大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位申請論文として合格と認められる。