

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 楊 驍  
(ヨウ ギョウ)

本論文は「Study on SPAD Imagers with Quick Readout Circuits (和文：高速読み出し SPAD イメージャに関する研究)」と題し、SPAD (単一光子検出アバランシェダイオード) アレイから成る画像取得デバイス (イメージャ) において光子を受信した画素を選択的に高速に読み出す回路を研究し、汎用半導体集積回路技術を用いた試作実験をとおしてその有効性を示したもので、英文で記述され七章より構成されている。

第一章は「Introduction (序論)」であり、本研究の背景となる従来からの光増倍管や SPAD デバイスを用いた単一光子検出手法の現状を説明し、本研究の目的を明らかにし、本論文の構成について述べている。

第二章は「Principles and design consideration of SPAD (SPADの原理と設計上の留意事項)」と題し、SPADの動作原理を説明した後、トンネル電流防止等の半導体デバイス構造上の留意点について述べている。さらにSPADにおける問題点として背景雑音 (Dark Count Rate) とアフターパルス現象について説明し、その対処法として本研究で用いる統計的フィルタによる雑音除外効果と光子検出後の休止時間 (Hold-off Time) によるアフターパルス抑止効果について述べている。

第三章は「CMOS SPAD Implementation (CMOS を用いた SPAD の実現)」と題し、デジアナ混載 LSI 用の深い pn 接合分離構造を有する汎用 CMOS 技術を用いて、SPAD 構造を実現するための試みと結果について述べている。いくつかの利用可能な pn 接合を SPAD として用いた場合の優劣をガードリング構造の有無とともに考察し、逆バイアス時の降伏現象が SPAD の実現に適しているかを実験的に確認して最適構造を見出し、背景雑音特性、温度特性、アフターパルス特性等の諸特性を測定し、SPAD イメージャ設計の基礎データとしている。

第四章は「SPAD Imagers with Breakdown-Pixel-Extraction Architecture (降伏画素抽出機構を備えた SPAD イメージャ)」と題し、本研究で発想した降伏画素の高速抽出機構のアーキテクチャを説明している。提案アーキテクチャの読出し時間特性を解析し、具体的回路設計を示したあと、研究の進展とともに進化した三種類のチップアーキテクチャ、つまり光子検出と読出しを順次的に行うもの、光子検出と読出しを並行して行うもの、光子検出と背景雑音除去付き読出しを並行して行うものの詳細な回路設計と期待される動作を述べている。

第五章は「Experimental Results of SPAD Imagers with BPE Architecture (降伏画素抽出機構付き SPAD イメージャの実験結果)」と題し、前章で説明した三つのチップアーキテクチャを試作し、測定した実験結果について述べている。この実験を通して三つのアーキテクチャが設計段階で期待した動作を

行っていることを示し、SPAD 画素ごとの背景雑音分布を計測し、光子検出効率の測定結果についても述べている。

第六章は「SPAD Imager with Asynchronous Current Logic Event Discriminator (非同期電流論理によるイベント弁別機構を備えた SPAD イメージャ)」と題し、前章までに研究したイメージャがクロックで定められた時間フレーム単位で降伏画素の発生を検出し読み出すものであったのに対し、SPAD 画素毎に独立して光子検出期間と休止期間を繰り返すイメージャについて提案している。これは一定数以上の降伏画素の休止期間が重なった場合にイベントを非同期的に発生する機構を備えたもので、イベント駆動回路によって降伏画素を記憶し、その後、前章までで検討した手法等で読み出す方式について検討している。これにより背景雑音以外の有効な光子が到来した直後に非同期的に現象発生の時刻と光子イメージを把握できる利点がある。本章ではこの提案方式の SPAD 画素およびイベント検出回路を具体的に設計試作し、提案手法の有用性を示している。

第七章は「Conclusions (結論)」であり本論文の研究成果をまとめている。本研究で提案し実証実験を行った各方式の結果を比較するとともに、各章ごとの結果についてまとめている。

以上、本論文は単一光子検出アバランシェダイオード配列から成るイメージャにおいて、光子を検出した画素を選択的に高速読出しする方式を提案し、半導体集積回路技術を用いてその有効性を実証したもので電子工学の発展に寄与する点が少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格したものと認められる。