

2025年 2月 25日

豊橋技術科学大学長 殿

電気・電子情報工学専攻

学位審査委員会

委員長 内田 裕久



## 論文審査及び最終試験の結果報告

このことについて、博士学位論文審査を実施し、下記の結果を得ましたので報告いたします。

学位申請者	井出 智也		学籍番号	第 183208 号
申請学位	博士 (工学)	専攻名	大学院工学研究科博士後期課程 電気・電子情報工学 専攻	
博士学位 論文名	波長情報を検出可能なCMOSイメージセンサの開発 (Developments of CMOS image sensors detecting wavelength information)			
論文審査の 期間	2025年 1月 16日 ~ 2025年 2月 25日			
公開審査会 の日	2025年 2月 5日	最終試験の 実施日	2025年 2月 13日	
論文審査の 結果*	合格		最終試験の 結果*	合格
審査委員会 (学位規程第6条)				
学位申請者にかかる博士学位論文について、論文審査、公開審査会及び最終試験を行い、別紙論文内容の要旨及び審査結果の要旨のとおり確認したので、学位審査委員会に報告します。				
委員長	石川 靖彦			
委員	澤田 和明		高橋 一浩	
	稲田 亮史			印
		印		印

※論文審査の結果及び最終試験の結果は「合格」又は「不合格」の評語で記入すること。

## 論文内容の要旨

生体組織は無色透明であるため、動態が観測しやすいように試薬により染色され、蛍光顕微鏡を用いた観測が行われている。蛍光顕微鏡は特定の蛍光波長のみを観測できるようフィルタ、ミラー、レンズといった多くの光学部品により構成されている。したがって装置が大型化ならびに複雑化し臨床現場への導入が難しいという課題がある。近年、半導体集積化技術を用いた小型チップにより蛍光検出を容易に行えるデバイスの開発が進められている。これまで汎用のCMOSイメージセンサ上に蛍光フィルタを直接形成し、特定の蛍光の波長帯のみを観測可能とする蛍光イメージセンサが実現されてきた。しかしながら、このイメージセンサではセンサ上に形成したフィルタの光学特性は固定であり、蛍光顕微鏡のように様々な波長情報を検出することができない。そこで、本論文は光学フィルタを必要とせずに光の強度と波長情報を、時空間情報を保ったまま検出可能なCMOSイメージセンサの実現を目的とし、新規イメージセンサの開発と生命科学分野への応用を検討している。

本論文は全6章で構成されている。第1章は、研究の背景、研究目的を述べている。第2章では、波長情報を検出可能なセンサを提案し、その原理について記述している。第3章では、第2章で提案したセンサを作製し、その性能を評価した結果を示している。第4章では、第3章で実証したセンサをアレイ化し、時空間的に波長および強度を可視化するイメージセンサの実現に向けて回路構成を検討し、実際に製作を行った結果を示している。第5章では、2種類の特徴的な蛍光を放出するレジオネラ菌を用いて、それらの蛍光波長の空間分布を観測した結果を述べ、開発したセンサの有用性を明らかにしている。第6章では、全体を総括して提案する手法の将来課題に言及している。

## 審査結果の要旨

バイオ・生命科学分野において蛍光検出を用いた細胞、ウイルス、細菌などの観測には蛍光顕微鏡が用いられている。一方、蛍光顕微鏡は多数の光学部品により構成されており、大規模かつ複雑な構造となっており、蛍光検出技術を幅広い分野で活用するためにはコンパクトかつシンプルなセンサデバイスの実現が求められている。

本論文では、半導体内の電位分布を利用することで、入射光により発生した電子をセンサの受光面側と奥側に分離して計測し、それらの比率から波長を識別するという原理を新たに提案し、光学フィルタを用いずに波長情報を検出可能なイメージセンサを実現することに成功している。二重拡散ウェル構造により形成したpn接合を利用して半導体内の電位分布を鞍状に形成することで、入射光の波長分布の重心を0.1 nmの分解能で440-1000 nmの範囲で検出可能であることを実験的に実証したことは高く評価できる。さらに本センサの基本技術を応用し、CMOS技術を用いて時空間情報を維持し、波長および強度を同時に可視化できるイメージセンサの実現に成功している。450  $\mu\text{m}$ ピッチ、10 $\times$ 10画素、4 mm角のイメージセンサを本学の半導体製造施設にて試作し、30枚/秒で動画像として取得できており、世界で初めて入射光の波長分布の重心をリアルタイムに可視化できるイメージセンサを実現している。さらに実現したイメージセンサを用いて、470 nmの光照射によるレジオネラ菌の蛍光強度の減衰、および蛍光波長が変化していく様子をリアルタイムに可視化することに成功しており、生きた対象に対しても時空間的に挙動を解明する有力な生体観測ツールであることを実証している。

これら一連の成果は、CMOS集積回路技術を用いた新たな可視化計測技術として高く評価でき、今後生命科学分野だけでなく工業分野における応用展開が期待できる。以上により、本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと判断した。

(各要旨は1ページ以上可)