

氏 名 浜崎 竜太郎

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2068 号

学位授与の日付 平成 31年 3 月 22 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 SOI 技術を用いた軟 X 線用 CMOS-APD 撮像検出器の研究  
開発

論文審査委員 主 査 准教授 西田 昌平  
教授 岸本 俊二  
准教授 外川 学  
講師 池上 陽一  
講師 三好 敏喜  
講師 坪山 透  
特別教授 新井 康夫  
高エネルギー加速器科学研究機構  
素粒子原子核研究所  
特別教授 倉知 郁夫  
高エネルギー加速器科学研究機構  
先端加速器推進部

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 浜崎 竜太郎

論文題目 SOI 技術を用いた軟 X 線用 CMOS-APD 撮像検出器の研究開発

軟X線 (0. -4.0 KeV) を用いた材料分析はそのエネルギーが十分低いため新規薄膜材料の評価手法として近年注目されている。特に、磁性薄膜の磁気特性を評価する手法として、円偏光した軟X線を用いる方法が提案されている。円偏光した軟X線を磁界中の試料に照射することで、左回りと右回りで吸収スペクトルに差異が生じ、この差分を求めることで磁気的な特性を評価することが可能となる。これはX線磁気円二色性 (X-ray Magnetic Circular Dichroism, XMCD) と呼ばれている。この手法は、近年次世代の半導体メモリの一つとして考えられている磁性体薄膜を用いたMagnetoresistive Random Access Memory (MRAM) の材料開発には非常に有効な手法と考えられる。MRAMは1nm程度の薄い絶縁体の薄膜を2枚の強磁性体で挟んだトンネル磁気抵抗(Tunneling Magneto Resistance, TMR) 素子を用いた高速かつ不揮発性のメモリである。TMR素子は2枚の強磁性体の磁化 (スピンの極性) の向きにより、電子が薄い絶縁層を通り抜ける“量子トンネル効果”の確率が異なり、磁化が平行/非平行のとき電流の流れやすさで高/低コンタクトダンスとなるTMR効果を利用した素子である。MRAMはこのTMR素子をワード線、ビット線を通して、TMR素子のスピンの向きによりビット情報の読み書きを行う。現在、TMR素子には3d遷移金属 (3d電子軌道に不対電子がある) であるMn, Fe, Coなどの合金が使用され、これらの材料開発には磁性薄膜の磁気特性評価が不可欠であり、軟X線を用いたXMCD分析は材料開発を加速化する上でも重要な技術となっている。また、軟X線領域のXMCDでは、特に表面敏感であることから、軟X線と試料の相互作用で生じるオージェ電子を検出する電子収集法が行われる。この電子の出射角は吸収される深度に依存するため、軟X線固体撮像素子を用いて深さ方向の情報も加えた、深さ分解XMCDという手法が行われている。従来の深さ分解XMCD法の検出器システムにおいては、試料に照射された円偏光した軟X線が試料で回折し、Microchannel plateに入射後、Phosphor screenで可視光に変換される。その可視光がCCDカメラによって撮像されることで軟X線による試料の回折像を観察する。しかしながら、この方法では軟X線を間接的 (可視光に変換) しか観察できないため、更なる位置分解能の向上には限界があった。つまり、より高精細な軟X線の回折像を得るためには、軟X線を直接観察できる固体撮像素子の開発の要望が高まっている。そこで本研究で提案を行う軟X線固体撮像素子の実現によって、より高感度に磁性薄膜の深さ方向の磁気特性も評価可能となり、MRAMに代表される磁性材料素子の実現に貢献できるものと考えている。この軟X線固体撮像素子の実験側に対する要求仕様は600-900 eVの軟X線に対して十分な信号雑音比を得る必要があり、また出射角において角度分解を行うためピクセルサイズ100  $\mu$  m以下、1pixel当たり $10^6$ 以上以上のカウントレートに 대응することが要求される。これらの実験から検出器側への要求に応じて、本研究では、表面配線等の吸収を抑えるため裏面照射型かつ微弱信号検出用途に応じるため内部利得を有するReach Through-Avalanche Photon Diode (RT-APD) を実装し、

ピクセル構造及び読み出しには半導体ウエハ製造工程の1つであるSilicon On Insulator (SOI) 構造を基に、センサー回路一体型のモノリシックな検出器であるSOI-RT-APDの提案を行い、その実用レベルの実現可能性について検討を行うことにした。これらの開発・検討事項において、まず裏面照射型においては完全空乏化が必要であるが、本研究で検討を行う8inchウエハを使用したSOIプロセスでは縦型拡散炉となり、高温・長時間熱処理を行うとウエハの自重により石英ボードとの接触部にスリップが発生してしまう。そこで、RT-APDの増倍層を従来の熱拡散法ではなく、イオン注入の多段打ちによりプロファイルを作成し高温・短時間熱処理であるRapid Thermal Annealing (RTA)により作成を検討することにした。次に後段のエレクトロニクスを考慮してデバイス側の要求条件としてRT-APDの内部利得を10倍以上、ノイズ因子であるイオン化率比 $k$ -factorを0.2以下とすることにした。尚、 $k$ -factorは電子・正孔のイオン化率の割合で評価した。これらの要求特性を満足できるSOI-RT-APD素子構造を探索するため本研究では半導体デバイスシミュレータTechnology CAD (TCAD)を用いてRT-APDの詳細なプロセス設計とデバイス構造設計検討を行うことにした。SOIプロセスで製造可能な広範囲の条件を振り最適化を行った結果、内部利得55倍、 $k$ -factor=0.13という高感度・低ノイズの性能を確認することに成功し、SOI-RT-APD素子の実現可能性を示した。

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 浜崎 竜太郎

Title  
論文題目 SOI 技術を用いた軟 X 線用 CMOS-APD 撮像検出器の研究開発

本博士論文は、SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いた新しい軟 X 線用 CMOS-APD (Avalanche Photo Diode) 撮像検出器の研究開発に関するものである。次世代磁気メモリ MRAM の開発などに有用である「深さ分解 XMCD 法」では、軟 X 線を試料に照射して出てくる蛍光 X 線を直接観測できる撮像素子が有効である。この目的のため、SOI 技術を用いて新しい APD の開発を、デバイスシミュレーションを用いて行われた。まず、既存の APD を用いて、ゲインについてシミュレーションと実測値の比較が行われ、シミュレーションの妥当性を示した。その上で、SOI 技術を用いたリーチスルー型 APD を多段イオン注入法で用いて製作することを世界で初めて提案し、デバイスシミュレーションを用いて様々なパラメータ（多段イオン注入のための広範囲なドーズ条件）について、ゲインと  $k$  ファクター（電子と正孔のイオン化率の比でノイズの指標となる量）を見積もった。その結果、目標を大幅に上回る構造が実現できるパラメータが見つかった。また、アバランシェ増幅を行う部分の端部での構造についても 2 次元シミュレーションを行い、エッジ部の局所電場集中を抑制する構造が効果的であることを示した。さらに、SOI を用いて十分なゲインを持った低雑音信号処理回路を回路シミュレーション上で確認した。今後、実際のデバイスを作成する段階では課題があると予想されるものの、軟 X 線領域に感度があるリーチスルー型 APD を SOI 技術を用いて開発する道筋が示されたといえる。

本研究については、過去に国際会議で 5 回ポスター発表を行っており、2018 年 11 月に開催された PD2018 国際会議での発表内容については英文のプロシーディングを執筆中である。

審査委員会で審議したところ、本研究は、デバイスシミュレーションの範囲内にとどまってはいるものの、新手法による新しい APD を提案しており、それに対する最適化と性能の評価を適切に行っており、学術的に意義のあるものと認められた。よって、審査員全員一致で本博士論文審査を合格とした。