



Title	医療及び産業応用半導体放射線検出器の研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	上野, 雄一郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12763号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65468
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuichiro_Ueno_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 上野 雄一郎

学 位 論 文 題 名

医療及び産業応用半導体放射線検出器の研究

(Studies of semiconductor radiation detectors for medical and industrial uses)

放射線検出器として、従来から広く使用されてきたシンチレータに代わり、近年半導体検出器が注目を集めると共に実用化が進んでいる。シンチレータは、一般的に感度及び時間分解能に優れるが、エネルギー分解能があまり高くなく、また計測に光電子増倍管が必要であり小型化、微細化が困難であった。一方、半導体検出器は、シンチレータと比較して感度及び時間分解能は及ばないものの、放射線を直接電気信号に変換するもので信号量が多いのでエネルギー分解能が高いこと、及び微細化が容易であり高い空間分解能が得られることが特徴である。

半導体検出器で実用化されているものには Ge、Si、CdTe(CdZnTe) 等がある。Ge はエネルギー分解能が高くスペクトル分析装置に広く適用されているが、反面、液体窒素による冷却が必要でありその他の産業機器への適用事例は限られている。Si 半導体検出器は、原子番号が小さく放射線吸収特性が空気に近いためにエネルギー特性に優れており、広く線量計に利用されている。反面、感度が低く、感度が重要となるような産業機器への適用は困難である。一方、CdTe(CdZnTe) 検出器は、室温で使用可能でありまた比較的原子番号も高く、産業応用として最も注目される半導体素子である。実用化に向けては、十分な大きさ、量、質が伴った低コスト結晶が求められるが、近年の結晶育成技術の向上により良質な結晶の供給が可能となっており、産業・医療機器への適用が進んできた。そこで、本研究では、CdTe 半導体検出器のもつ高いポテンシャルに着目し、高精度な CdTe 半導体検出器応用システムの実現を目指して、CdTe 半導体検出器の実用化技術を検討した。

半導体検出器の特徴である高エネルギー分解能及び高空間分解能を実現した高精度な応用システムを実現するためには、膨大な数の検出器と増幅回路とが必要であり、半導体検出器の微小な電荷信号を増幅する低ノイズ集積回路 (ASIC) 技術が必須となる。また、システム化に当たり半導体検出器の短所である感度や時間分解能の改善も重要な技術課題である。そこで、我々は、半導体検出器の特徴を活かすと共に短所を改善した高精度システムを実用化することを目的に、様々な実用化課題を解決するための基盤技術、及び半導体 PET 装置及び環境用ガンマカメラの実用化に向けた装置特有の課題を解決するための特性改善技術をそれぞれ構築した。更に、開発した半導体 PET 装置及び環境用ガンマカメラにおいて、それらの開発技術の有効性を検証した。

第 1 章においては、研究対象である CdTe 半導体検出器、医療及び産業用の対象機器である PET 装置及び環境用のガンマカメラの原理について説明するとともに、本研究の進め方を記した。

第 2 章においては、上述のように半導体検出器を実用化する上で必要不可欠である基盤技術について記した。構築した基盤技術は、パイパラメトリック信号処理技術と ASIC 技術である。パイパラメトリック信号処理とは、電子と正孔の移動度の違いに着目し、電子と正孔の割合を求めて各種特性改善を図る技術である。具体的には、二つの時定数の異なるシェーピングアンプ出力を得て、2 次元の波高値ダイアグラムを作成して電子寄与率を判定することにより、エネルギー補正、時間分解能補正及びノイズ除去の 3 種の性能改善を図る技術である。基盤技術の二つ目として、半導

体検出器信号の読み出し回路を高密度実装したアナログ ASIC を開発した。本 ASIC は、検出器からの入力が数十から数百 $M\Omega$ と高インピーダンスであり、かつ検出器で発生する電荷は $5fC$ から $20fC$ 程度と非常に小さいなど特殊なものであり、専用にゼロから開発した。特に大きな問題となったデジタル信号のクロストークノイズ等の解決を図り、低ノイズ、高集積な PET 用とガンマカメラ用の 2 種類の ASIC を実用化した。

第 3 章においては、医療応用として半導体 PET 装置技術について記した。基盤技術である ASIC を実装して、高エネルギーと高空間分解能を図った。また、基盤技術であるバイパラメトリック信号処理の中の、時間分解能補正とノイズ除去技術を適用することにより、半導体検出器の欠点である時間分解能を改善し、約 76,000 チャンネルの巨大システムでの安定動作を可能とし、臨床撮像を実現した。更に、半導体検出器の最大の課題である感度に関して、両面実装技術の構築及び ASIC の低消費電力・高集積化等により装置の 3 次元化を図るとともに、検出器内での散乱イベントを有効化する検出器内散乱線処理技術を検討した。特に検出器内散乱線処理技術は、ASIC 技術及びバイパラメトリック信号処理技術を駆使したもので、感度を約 4 倍に向上した。これらの基盤技術および PET 装置の特性改善技術について、開発装置の基本特性試験及び実臨床試験にて検証してその有効性を確認した。

第 4 章においては、産業応用として環境用のガンマカメラについて検討した結果を示した。半導体検出器の特徴を活かすことにより高精度化が望めるピンホールタイプガンマカメラを選択し、高線量場と低線量場の相反する環境にそれぞれ適応した 2 種のガンマカメラ技術を構築した。基盤技術の低ノイズ、高集積 ASIC を実装することにより小型コンパクト化を実現した 2 次元ピクセル状の検出器モジュールを用いて、軽量で高性能なガンマカメラを実現した。また、基盤技術であるバイパラメトリック信号処理におけるエネルギー分解能補正を適用することにより、厚い CdTe 素子 (2.2mm 厚) でのエネルギー分解能を向上 ($662keV$ にて 2.7%) し、ガンマカメラにおける核種同定を可能とした。高線量場対応の特性改善技術としては、ピンホールコリメータ及びシールド厚を最適化して、更に ASIC の高計数率化の改良も行い、最大の環境線量率を $1.4Sv/h$ まで改善した。実際に福島第一原子力発電所 1 号機の高線量領域の調査を実施し、 $659mSv/h$ の高線量環境においても飽和することなく正常に動作して、未知の汚染源を特定することができた。また、低線量場使用のために感度向上技術を検討した。具体的には、三つの手法 (バイパラメトリック信号処理のノイズ低減によるエネルギーウインドウの拡大、感度及び空間分機能の評価しピンホール径の最適化、統計ノイズを抑制するスムージングフィルタ) を検討し、合計で従来比約 11 倍の感度向上を実現した。開発した 2 種のガンマカメラは、実際に福島第一原子力発電所内および福島エリアでそれぞれ活用されており、構築した基盤技術および PET 装置の特性改善技術の有効性が確認された。

以上、開発した半導体検出器の基盤技術である ASIC とバイパラメトリック信号処理技術及び、半導体 PET 装置やガンマカメラ (高線量場用・低線量場用) 特有の特性改善技術の有効性が示された。これらの技術は、開発した PET やガンマカメラはもちろん、その他の放射線計測関係機器の半導体検出器による高精度化・高度化に寄与するものと考ええる。