

称号及び氏名 博士（工学） 史 豊銓

学位授与の日付 2020年3月31日

論文名 「耐放射線性を向上させた半導体前置増幅器の開発」

論文審査委員 主査 谷口 良一

副査 川又 修一

副査 宮丸 広幸

## 論文要旨

半導体素子は以前から放射線に弱い素子だと考えられてきた。そのため、原子炉あるいは宇宙環境のように放射線環境での利用が避けられない対象に関しては耐放射線性の高い半導体集積回路の開発も行われてきた。ところが半導体集積回路の開発速度は耐放射線半導体の研究よりも早く、半導体素子は一層集積回路化が進み、個々の能動素子はさらに小型化し、近年の半導体素子は極端に放射線に弱いものになっている。

ところが近年、半導体の放射線損傷が再び注目されるようになってきている。福島原子炉事故での処理では、使用したロボットの撮像素子あるいは制御装置の放射線損傷が大きな問題となっている。宇宙開発分野でも地球から遠く離れた飛行を長期間行う静止衛星、惑星間宇宙機などでは放射線損傷が大きな問題となることが予想されている。そのため耐放射線の半導体の回路技術の開発が強く求められるようになってきている。

本研究では、放射線に晒されることが不可避である放射線モニターのプリアンプを対象として、耐放射線性を持った直流増幅器回路を開発した。さらに本モニターは、放射線障害防止法の防護措置に対応するために、通常の線源使用時の放射線モニター以外に、線源格納時の漏洩線量測定も同時に行うことを目的としている。その結果、Gy/h から  $\mu$ Gy/h までの線量を測定することが必要となり、6桁に及ぶダイナミックレンジが要求される。

そもそも大線量放射線モニターは強い放射線の照射を避けることができないこともあり、プリアンプにも耐放射線性が要求される。ところが半導体素子の大半は放射線に弱く、特に集積回路化された素子は 100Gy 程度の照射しか堪えられないとされてきた。これでは大線量放射線モニターとして使用することは困難である。プリアンプを検出器から離し放射線を避けることも考えられるが、伝送線路の浮遊容量、誘導ノイズ等が問題となり、特に微弱線量測定が困難となる。広いダイナミックレンジを得るためには、検出器に直結したプリアンプが不可欠である。そのため本研究では、新たに耐放射線性の高いプリアンプを開発することを計画した。

回路の主要な要素である増幅素子には、半導体素子の中で最も放射線に強いとされる接合型

FET (J-FET)を中心に回路を構成することを考えた。第3章では、この素子単体の $\gamma$ 線照射を行い、放射線照射による特性の変化を評価した。その結果、J-FETの増幅度に相当する相互コンダクタンスは100kGy程度の照射では、それほど変化せず、十分な耐放射線性が確認された。ところが、本放射線照射ではJ-FETの遮断電圧の変化が問題であることも明らかとなった。遮断電圧は低い照射線量でも変化した。J-FETは、相互コンダクタンスから見ると100kGy以上耐える素子であるが、遮断電圧から見ると数kGy程度の耐放射線性であることが明らかとなった。

そのため、この遮断電圧の変化の影響を回路的に抑制するプリアンプ回路の設計を行った。回路設計では、シミュレーションソフトであるSPICEを用いた。SPICEは回路設計のためのソフトウェアであり、モデル化した回路要素を組み合わせることで回路をコンピュータ上で構成し、様々な応答を解析するものであり、これによって回路設計の時間が大幅に短縮される。ただし、現存する各種のSPICEプログラムに放射線影響を評価する機能は存在しない。そのため本研究では、前節の $\gamma$ 線照射時に得られたJ-FETの動作パラメータの変化データをSPICEのモデルに代入するという方法で、放射線照射の影響を評価した。

最初に、2つのJ-FETを差動型に配置することを考えた。これは放射線の照射によってJ-FETの遮断電圧が変化した場合でも、差動配置のためにその影響が相殺され軽減されることを期待したものである。しかしながら、この回路の放射線照射応答をSPICEで評価した結果、低線量照射時でも、回路のオフセット電圧が大きく変化することが明らかとなった。これは、差動J-FETペアに共通するソース電圧が、放射線照射による遮断電圧の変化に対応して変動することが原因であることが推定された。そこで、解決策としてJ-FETのバイアス電流を定電流化するという回路を検討した。SPICEでの評価では、放射線照射によるオフセット電圧の変化は数十分の1程度に圧縮された。

試作したプリアンプは、分離された2つの部分で構成されている。前段は入力段であり開発設計したJ-FETによる増幅回路で構成され、放射線検出器に直結される。前段は高い耐放射線性を有し、100kGy程度のガンマ線照射でも使用できるものである。検出器から出力される微弱電流はここで増幅され、インピーダンスを変化させた上で後段に送られる。後段は通常の演算増幅器で構成されており、100Gy程度の照射が限界である。このため後段は検出器から離れた、放射線線量率の低い場所に設置する必要がある。また、この試作プリアンプの評価を行った結果、nAからpAにわたって十分な線形応答が得られていた。応答の揺らぎから推定されるアンプの検出感度は約2pAであった。

さらに、試作したプリアンプ回路の耐放射線性を評価するため、コバルト60線源を用いて放射線照射実験を行った。実験では、回路の前段部分のみを照射し、その後、前段部分を後段と接続し、入力電流と出力電圧の関係を調べた後、さらに前段部分を照射し、測定を繰り返した。その結果、アンプのゲインの変化は100kGy程度の照射では数パーセント以下に収まっており実用上の問題は少ないと考えられた。これに対してオフセットの変化は、50kGyの照射までは数パーセントの変動で収まっていた。変動は照射量が100kGyを超えると定期的にオフセット補正する必要があるレベルとなるが、実用上は許容できる範囲の変化であった。

最後に、第6章では、今回試作した前置増幅器と電離箱検出器を組み合わせた放射線モニタシステムを構成し、検出感度の評価を行った。小線源を用いた試験で、この測定体系の検出感度は約 $4\mu\text{Sv/h}$ と評価された。この値は今後改良の余地はあるが、線源使用時の放射線モニターと線源格納時の漏えい線量のモニターが可能なダイナミックレンジであり、十分な性能であると評価された。

## 審査結果の要旨

福島原子炉事故の処理では、半導体素子の放射線損傷が大きな問題となっている。このため、放射線に強い制御素子、計測素子の開発が強く求められている。本研究では、放射線研究センターで用いる大線量放射線モニターの前置増幅器（プリアンプ）として放射線に強い半導体回路の開発を行い、従来に比べて100倍から1000倍も耐放射線性を向上させた半導体前置増幅回路を実現した。この結果は、上記モニターの開発にとどまらず、事故炉の処理の進展に大きく寄与するものと考えられる。その成果を以下に列挙する。

(1) 半導体素子は従来から放射線に弱いとされてきた。ことに集積回路化が進んだことから、近年は極端に放射線に弱い素子となっており、100 Gy程度の放射線照射が限界とされてきた。本研究では、半導体素子の中でも放射線に強いとされる接合型電界効果トランジスト（J-FET）に注目し、この素子を集積回路化せず、単体素子として回路を構成することで、耐放射線の向上を図った。J-FETのみを放射線照射して、特性変化の測定を行った結果では、素子の増幅率である相互コンダクタンスは100 kGy以上の放射線照射でも大きく変化しないことから有力な素子であることが明らかとなったが、もう1つの重要なパラメータである、素子の遮断電圧は少量の照射でも変化を始めており、このままではkGy程度の耐放射線性にとどまることが懸念された。

(2) 放射線照射による遮断電圧の変化の影響を抑制するための回路設計を行った。具体的には、2つのJ-FETを差動ペアとして用い、しかもバイアス電流を定電流化することで遮断電圧の変動の影響を数十分の1に圧縮できることを明らかにした。この研究では、回路シミュレータソフトであるSPICEのモデルに放射線照射で得られた実測値を代入するという新しい手法で開発を行った。

(3) 設計したプリアンプを試作し、これを大線量の放射線で照射し、特性の変化を評価した。その結果、100kGy程度の放射線照射でも使用可能であることが明らかとなった。さらにこのプリアンプを放射線モニターに用いる電離箱検出器と接続し、放射線モニターとしての基本性能を評価した結果、数kGy/hの大線量放射線から4 $\mu$ Gy/hの微弱放射線まで測定が可能であることが明らかとなった。

以上の研究結果は、耐放射線の高い半導体前置増幅器の開発という点で高く評価できる。また本研究の発表の一部は、原子力研究開発機構が運営する「福島原子力事故関連情報アーカイブFNAA」に昨年より掲載されており、原子炉事故対策の研究としてデータベースに登録されている。これらの成果は申請者が今後とも自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。