

原子力エレクトロニクス技術を活用した耐放射線半導体イメージセンサの開発

(受託者) 国立研究開発法人産業技術総合研究所

(研究代表者) 田中保宣 先進パワーエレクトロニクス研究センター

(再委託先) 国立大学法人広島大学、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

(研究期間) 平成28年度～30年度

1. 研究の背景とねらい

福島第一原発の廃炉プロセスにおいて最も重要な工程の一つに燃料デブリ取り出しが挙げられる。燃料デブリは、その位置、形状について、はっきりとした情報が得られていないため、それらを取り出すための方策も確定できていないのが現状である。燃料デブリの状態を把握するため、これまで圧力容器内部へ数多くのロボットが投入されてきたが、装着されているカメラの半導体イメージセンサは汎用品のため耐放射線性が低く、高線量率環境下の圧力容器内部では短時間で故障してしまい、燃料デブリの状況を把握するには至っていない。廃炉プロセスを順調に進めるためには、燃料デブリの状態を把握することが急務の課題であり、そのための小型・軽量の耐放射線半導体イメージセンサの早期の実用化が望まれている。

半導体イメージセンサは小型、低消費電力という観点から非常に優れたイメージセンサであり、デジカメ等、広く一般に普及している。但し、放射線に対して脆弱な Si-MOS 界面を内包するため、高線量率環境下では短時間で動作不良になることが大きな課題である。従来型の Si-MOS 構造を基本としたイメージセンサである限り、デバイス構造の工夫によりある程度の改善は可能であっても、これらの課題を根本的に解決することは極めて困難である。

一方、ワイドバンドギャップ (WBG) 半導体である炭化ケイ素 (SiC) は、Si と比較して原子間結合力が強く、放射線による弾き出しや電離による損傷が少ないため、耐放射線性が高いことが期待される。実際、我々が過去に実施した研究では⁽¹⁾、電流チャネルを半導体内部に持ち MOS 構造を伴わない SiC-BGSIT (Buried Gate Static Induction Transistor) では、10 MGy という極めて高い放射線環境下においても安定して動作し、高い耐放射線性を実証することに成功した。また、SiC-MOSFET においても、Si-MOSFET と同じく放射線に対して脆弱と考えられる MOS 界面を有しているにも拘わらず、室温・大気中では動作不良を起こすことはなかった⁽²⁾。

本研究では、SiC を活用した原子力エレクトロニクス技術を駆使し、耐放射線半導体イメージセンサを実現するための各種要素プロセス技術を開発するとともに、イメージセンサのプロトタイプを試作し、累積線量 2 MGy 以上の耐放射線性を達成することを最終目標としている。

2. これまでの研究成果

(1) ハイブリッド型 CMOS イメージセンサの技術開発

本研究開発の最終目標である累積線量 2 MGy を大幅に超える耐放射線性を実現するために、放射線に対して脆弱な MOS 構造を含まないスイッチとして SiC-JFET (SiC 接合型トランジスタ) を活用したイメージセンサの設計を進めた。ここでは、信号増幅部を 3 個のトランジスタ

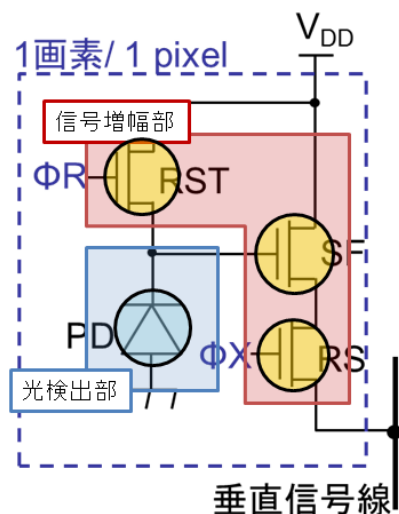


図1 3トランジスタ型イメージセンサの回路構成

で構成する、いわゆる 3 トランジスタ型 CMOS イメージセンサ構造を採用する (図 1)。基本的に各トランジスタにはノーマリオフ特性が求められるが、増幅回路の要であるソースフォロアスイッチ(SF)は高い相互コンダクタンスが求められる一方でノーマリオフ特性である必要性はない。ここでは、ノーマリオン・オフ特性を制御することを目的としたデバイス設計をシミュレーションにより実施した。

図 2 は SiC-JFET の断面構造であり、ゲート p 領域と p 基板の間に形成されるチャンネル領域の設計最適化によりノーマリオン・オフ特性を制御することが可能かどうか検証した。チャンネル長、n 不純物濃度は固定し、チャンネル幅を 3 水準で変化させた場合のドレイン電流・ゲート電圧 (I_d - V_g) 特性をシミュレーションにより計算した結果を図 3 に示す ($V_d=1V$)。チャンネル幅が最も狭い素子(c)ではノーマリオフ特性となる一方、チャンネル幅が最も広い素子(a)ではノーマリオン特性になっており、チャンネル幅によりノーマリオン・オフ特性の制御が可能であることが分かった。

図 4 は、チャンネル長、チャンネル幅を固定し、n 不純物濃度を变化させた場合の I_d - V_g 特性計算結果を示す。不純物濃度が高い素子(c)ではノーマリオン特性、低い素子(a)ではノーマリオフ特性が得られ、不純物濃度によってもノーマリオン・オフ特性の制御が可能であることが分かった。但し本研究では、同一の SiC 基板上にノーマリオン・オフ特性の SiC-JFET を作り込むため、一部のみ不純物濃度の異なる活性層を形成することは現実的ではなく、チャンネル幅により制御することが最も現実的な方法である事が明らかとなった。

(2) ハイブリッド型 CMOS イメージセンサの集積化技術開発

Si-MOSFET と比較すると耐放射線性が高いことが実証されている SiC-MOSFET による耐放射線イメージセンサ開発を念頭に、デバイス設計・プロセス・集積化技術の開発を進めた。まず、Si フォトダイオードと 3C-SiC MOSFET の試作を進めるとともに、Si フォトダイオードと 3 個の 3C-SiC MOSFET を同一半導体基板上に集積化した 1 画素イ

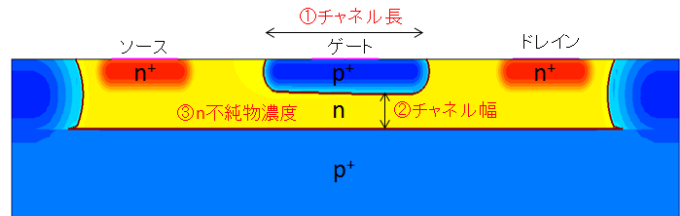


図 2 SiC-JFET の断面構造

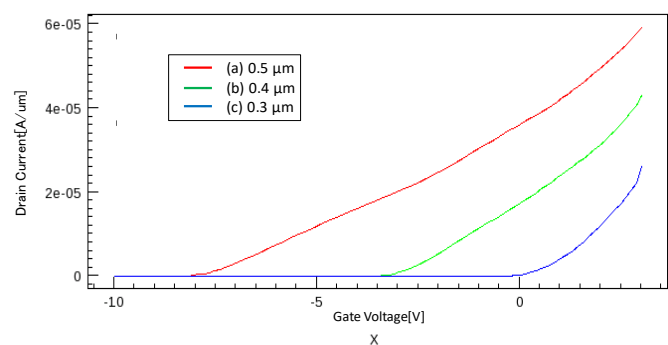


図 3 I_d - V_g 特性のチャンネル幅依存性

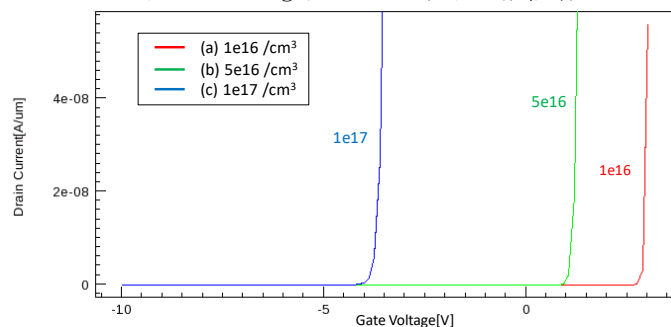


図 4 I_d - V_g 特性の n 不純物濃度依存性

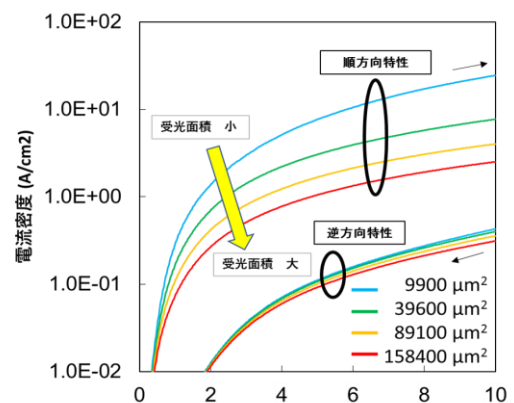


図 5 試作した Si フォトダイオードの整流

メージセンサの作製を進めた。

図 5 に試作した 3C-SiC 基板上の Si フォトダイオードの整流特性を示す。Si フォトダイオードの耐放射線性は、フォトダイオードそのものだけではなく、パッシベーション膜である層間絶縁膜 (SiO_2) との界面の効果が大きいと考えられる。放射線照射による界面準位形成により、フォトダイオード中で光照射により発生したキャリアのライフタイム低減効果が考えられる。同効果を評価するため、フォトダイオードの光照射面積を固定し、周辺長を変化させることとした。図 5 に示す通り、順方向、及び逆方向の何れの場合も、受光面積が小さいほど電流密度が大きくなっている。面積の大きいダイオードではキャリアライフタイムが短いために、ドリフト中に再結合してしまい、電流量が低下していると考えられる。

(3) イメージセンサの耐放射線性の評価と劣化機構の解明

イメージセンサを構成する各要素素子である、Si フォトダイオードや SiC スイッチングデバイスに乾燥窒素雰囲気中で放射線を照射可能な環境構築を進めた。更に開発した容器を用いて Si フォトダイオードと SiC-MOS キャパシタに対して放射線を照射し、照射前後における電流-電圧特性の測定により、照射劣化に関する基本的な情報を取得した。

図 7 に、フォトダイオードの (a) 順方向の電流電圧 (IV) 特性、及び (b) 逆方向の IV 特性に対する放射線照射線量依存性を示す。順方向の IV 特性 (図 7(a)) では、5kGy までの初期照射の時点で未照射の場合と比べ立ち上がり部分の電流値がわずかに増加しており、0.2V の時で電流値が 1 桁程度増加した。これは照射によりリーク電流パスが形成されたことが原因と考えられる。その後、更に放射線照射量を 1 MGy まで増加させても、IV 特性にほとんど変化が見られなかった。一方、逆方向の IV 特性 (図 7(b)) では、初期照射の時点で未照射の場合と比べてリーク電流が増加し、5V において 3 桁程度増加した。その後更に放射線照射量を 1 MGy まで増加させても、順方向特性の場合と同じく、リーク電流の増加は観察されなかった。これまでの Si の照射効果の研究結果から、5kGy 程度の照射では結晶損傷の効果はほとんどないことから、リーク電流の増加は結晶欠陥生成によるダイオードジャンクション (pn 接合、p 又は ni 接合部) の特性劣化ではなく、

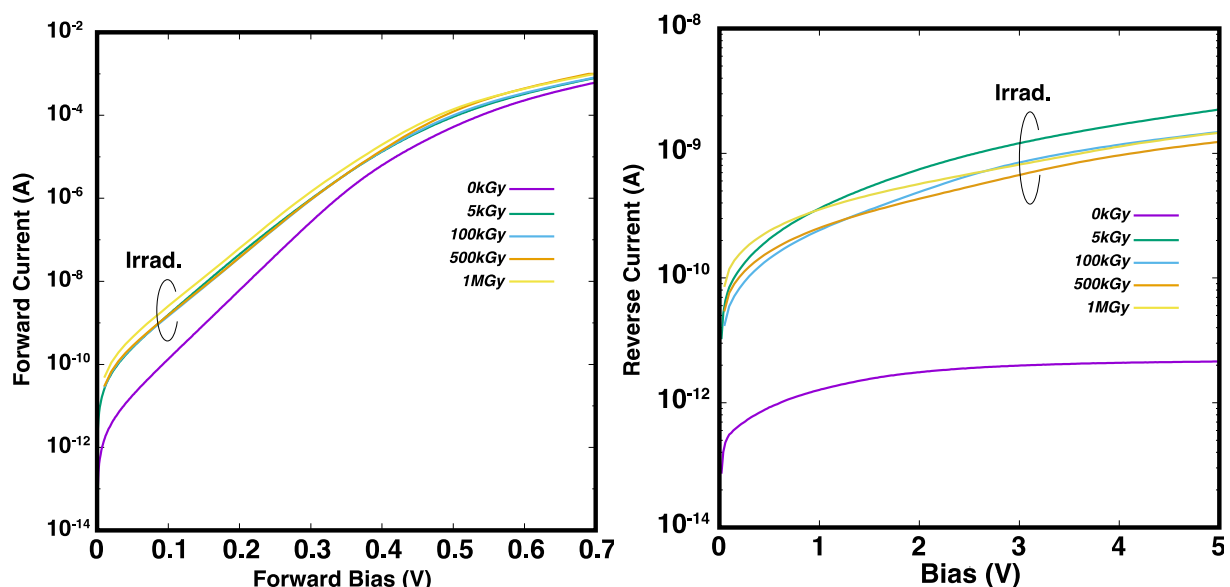


図 7 (a) 順方向 電流-電圧特性 (b) 逆方向 電流-電圧特性に対する放射線照射線量依存性

放射線照射によってデバイス表面の保護絶縁膜中に電荷が蓄積しリーク電流が発生したことが推察される。以上から、Si フォトダイオードの耐放射線性向上には、照射に伴う表面でのリーク源の増加抑制が重要であると言える。また、Si フォトダイオードを SiC-MOSFET と組み合わせイメージセンサを作製する場合、これらのリーク電流を考慮した回路設計を行うことが重要であると言える。

図 8 に、MOS キャパシタの容量電圧 (CV) 特性に対する放射線照射線量依存性を示す。照射線量は 0 kGy(未照射)と 10 kGy、50kGy とし、照射後、それぞれの CV 特性を測定した。容量の値は、各測定値の最大値で規格化し、 C/C_{ox} として示している。1 回の測定における印加電圧は、正方向から負方向にスイープし再度、負方向から正方向にスイープした。このようにして、照射に伴う容量-電圧特性のヒステリシスの有無も確認した。いずれの結果においても、ヒステリシスはほとんど見られなかった。線量の増加に伴い、容量-電圧特性は負方向にシフトした。過去の Si-MOS キャパシタの知見から、負方向へのシフトは放射線によって酸化膜中に正の固定電荷が生成する事が原因であると考えられ、50kGy までの範囲では SiC-MOS キャパシタにおいても同様の現象が見られることがわかった。このことより、SiC-MOSFET の設計時においてはゲートの閾値電圧の変動を考慮する必要があることがわかった。

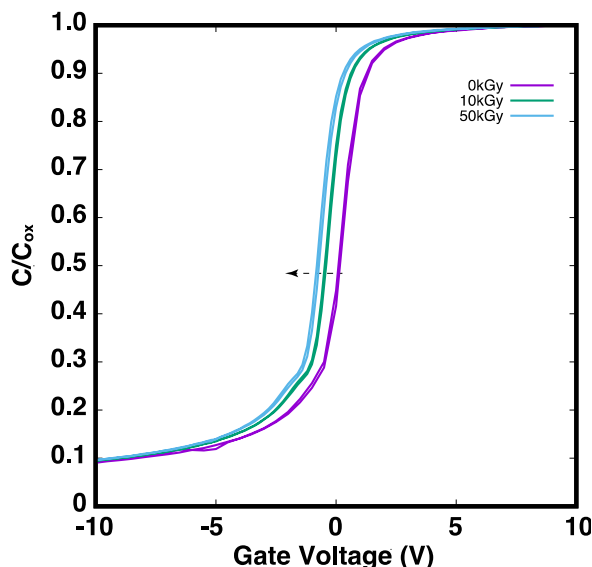


図 8 MOS キャパシタの容量-電圧特性に対する放射線照射線量依存性

3. 今後の研究

耐放射線イメージセンサを構成する要素デバイス (Si フォトダイオード、SiC-JFET、SiC-MOSFET) のデバイス設計指針はほぼ固まり、放射線照射効果の評価を一部開始している。今後は、各要素デバイスの耐放射線性評価を進め、目標値である 2 MGy の耐放射線性を達成するとともに、イメージセンサのプロトタイプを試作し、同じく目標値である 2 MGy の耐放射線性達成することを目標とする。

4. 参考文献 (書き方の例)

- (1) 原子力システム研究開発事業、及び原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ成果報告会資料集「革新的原子力エレクトロニクス技術を活用した原子炉制御・保全システムに関する基盤研究」(URL: [http:// www.jst.go.jp/nrd/result/h22/p35.html](http://www.jst.go.jp/nrd/result/h22/p35.html))
- (2) T. Ohshima, S. Onoda, N. Iwamoto, T. Makino, M. Arai, Y. Tanaka, “Radiation Response of Silicon Carbide Diodes and Transistors” Chapter 16 of “Physics and Technology of Silicon Carbide Devices” Edited by Y. Hijikata, InTech, ISBN 978-953-51-0917-4, 2013.