HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	水素終端ダイヤモンドMOSFETの過酷環境耐性と実用的回路への応用に関する研究
Author(s)	山口, 卓宏
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16845号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16845
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99690
Type	doctoral thesis
File Information	Takahiro_Yamaguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　山口　卓宏

学　位　論　文　題　名

水素終端ダイヤモンド MOSFET の過酷環境耐性と実用的回路への応用に関する研究
(Research on Harsh-Environment Robustness and Practical Circuit Applications of Hydrogen-Terminated Diamond MOSFETs)

高温・高放射線環境下で動作可能な計測・制御系の開発は、原子炉計装、核燃料サイクル施設の監視、さらには福島第一原子力発電所の廃炉事業における燃料デブリ取り扱いなど、多様な領域で急速に重要性を増している。このような極限環境下では、従来のシリコン半導体では動作が著しく制限されるため、広いバンドギャップ、高熱伝導率、高耐放射線性といった特性を併せ持つ新規材料の実装が不可欠となる。ダイヤモンド半導体は、理論限界特性において SiC や GaN を大きく上回り、極限環境エレクトロニクスの有力候補として位置づけられている。

ダイヤモンドデバイスには大きく二つの系統が存在する。ホウ素添加ダイヤモンド (B-doped diamond) は高温・高線量環境に対して極めて高い安定性を示すものの、電流駆動能力が低く、電力素子やアナログ回路への展開には制約が大きい。一方、水素終端ダイヤモンド (H-diamond) は表面に二次元正孔ガス (2DHG) が形成されることで高い導電性を示すが、表面終端の化学状態や吸着種に強く依存し外部環境に対して不安定であるとされてきた。このため、H-diamond を極限環境デバイスへ応用することは一般に難しいと見なされてきた。

本研究では、H-diamond 上の 2DHG を利用した MOSFET(以下 H-diamond MOSFET) を基本デバイスとして選択し、これまで困難とされてきた“水素終端ダイヤモンドを用いた極限環境エレクトロニクスの実証” に挑戦した。本論文は以下の五章から構成される。

第一章では、極限環境エレクトロニクスに用いる水素終端ダイヤモンド (H-diamond) デバイスの特長および、ダイヤモンド半導体が有する物性について述べる。まず、広いバンドギャップ、高いキャリア移動度、優れた熱伝導率、放射線耐性といったダイヤモンド固有の特性を整理し、水素終端表面に形成される二次元正孔ガス (2DHG) の電子的性質について概説する。次に、本研究で用いたダイヤモンドデバイス作製に関する基礎的事項として、マイクロ波プラズマ CVD 法によるダイヤモンド成長プロセス、水素終端形成および p^+ 層作製、原子層堆積法 (ALD) によるゲート絶縁膜形成、金属電極形成などのプロセスについて説明する。また、H-diamond MOSFET の動作原理、界面バンド構造、トランジスタ特性の評価手法について述べる。

第二章では H-diamond MOSFET の高温・高放射線耐性の向上に関する取組を報告する。高温原子層堆積法 (ALD) による Al_2O_3 膜を用いた MOS 構造を開発し、大気中 300 ℃での連続動作および 1 MGy 級 X 線トータルドーズ試験を実施した。その結果、照射初期に観測されるしきい値電圧のシフトは主として酸化膜中の電荷捕獲に起因すること、一定線量以上ではサブスレッショルド係数やトランスコンダクタンスが一定値へ収束することを世界で初めて示した。これは、外界の化学環境変動に弱く過酷環境応用が困難とされてきた H-diamond の安定性を、適切なパッシベーションにより大幅に向上できることを明確に示した画期的成果である。また、線質・線量率の違いが MOS 構造に与える影響を界面バンド構造および電荷捕獲モデルの観点から定性的に評価し、高線

量場でのデバイス物理を整理した。

第三章では H-diamond を用いた過酷環境対応イメージング技術 (ダイヤモンド CCD) の構築を目指した、複数層絶縁膜と多段ゲート電極からなる積層ブリッジ構造の開発に関し報告する。これにより、世界で初めて H-diamond マルチゲート FET による三相 CCD 基本素子の動作実証に成功した。得られた移動度、ゲート寸法、バイアス条件を基に Hecht 式を用いた電荷転送効率 (CTE) の解析を行い、現状デバイスで到達し得る CCD 性能の限界と、CCD 実現に必要なチャネル移動度・ゲート長・ゲート間距離の設計指針を明確化した。この成果は、従来研究が存在しなかった「ダイヤモンド CCD」という新規デバイス概念に、初めて体系的な物理的裏付けを与えるものである。

第四章では、原子炉格納容器雰囲気モニタなどを想定した 過酷環境用アナログ回路要素 (CSA, 定電圧回路, 定電流回路) の実装基盤技術検討について報告する。ゲート長 2–92 μm の 114 素子からなる RADDFET アレイを作製し、統計的解析および TLM を用いた接触抵抗・チャネル抵抗の分離評価を行った。その結果、各抵抗成分が gm・ro・オン抵抗のスケーリングに与える寄与を定量的に抽出することに成功し、差動増幅器や定電流源など基礎アナログ回路の設計に必要な「デバイス寸法と電気特性の対応関係」を初めて提示した。また、金を用いたオーミック電極と p^+ 層電極との比較から、接触抵抗の低減と長期安定性のトレードオフを明らかにし、過酷環境回路に適した電極構造指針を提案した。

以上の成果により、H-diamond MOSFET の基礎物性から放射線耐性、CCD 応用、アナログ回路応用に至るまで、極限環境エレクトロニクスに必要な要素技術を検証し、ダイヤモンドを活用した新たな高耐環境デバイス技術の実現へ大きく貢献した。本論文第 5 章では研究全体を総括し、デバイス材料・プロセス・構造・回路の統合的観点から将来展望を述べる。