

人類のフロンティア拡大を支えるSiC極限環境エレクトロニクスの確立

	研究代表者	広島大学・半導体産業技術研究所・教授 黒木 伸一郎 (くろき しんいちろう)	研究者番号：70400281
	研究課題情報	課題番号：24H00035 キーワード：シリコンカーバイド半導体、CMOS集積回路、高温、耐放射線	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

20世紀、人類の活動フロンティアは宇宙や深地など地理的最前線、大型加速器や核融合などの科学的フロンティアとともに進んできた。これを大きく支えたのは半導体エレクトロニクスであるが、活動の場がより極限的環境に進み、現在の性能では不足となりつつある。シリコンカーバイド (SiC) 半導体はバンドギャップが広く原子間結合が強い性質を持ち、このためSiCデバイスは高放射線・高温などの極限環境でも駆動可能である。本研究は、極限環境下でも駆動可能なSiC極限環境エレクトロニクスの研究を進め、これを確立することを目的とする。特に福島第一原子力発電所廃炉に必要なMGy (メガグレイ) 級耐放射線集積回路構築を目的とする。目標は、高周波駆動：> 100 MHz、耐放射線性 (ガンマ線)：> 2 MGy、超高温動作：> 500°Cでの動作可能な4H-SiC CMOS集積回路の研究を行う。

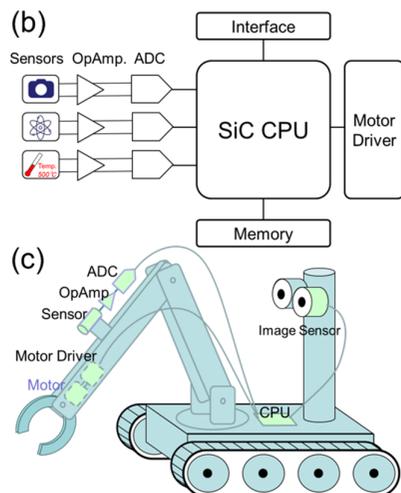
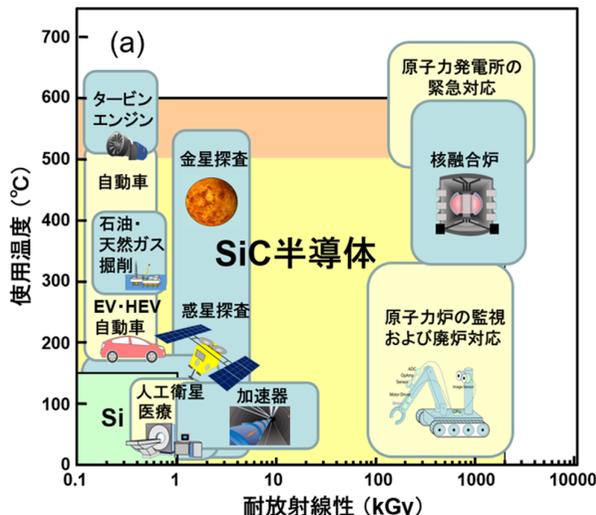


図1 (a) 本研究により開拓するフロンティア領域と、(b)この領域で必要とされるエレクトロニクス、(c) ロボットに実装された場合の各エレクトロニクスの対応：本研究では500°C・耐放射線性2MGy以上の領域を開拓し、自動車 (EV) や宇宙開発、原子力発電所廃炉対応などに寄与する。

●人類の活動フロンティア拡大と、極限環境というエレクトロニクスの新しい研究フロンティア

現在福島第一原発の廃炉活動が進められている。その活動には高放射線環境下でのロボットによる作業が必要であるが、通常ロボットのシリコン半導体集積回路は、高い放射線環境下で容易に破損する。従来の半導体集積回路では、CPUでは20-100 Gy、イメージセンサは10-100 Gy程度の放射線耐性であるが、廃炉対応においてはMGy (メガグレイ) 級の耐放射線性を持ったエレクトロニクス構築が至急望まれている。図1(a)に、耐放射線性 (トータルドーズ耐性) と使用可能温度を軸とした、極限環境でのエレクトロニクス要求を示す。従来のシリコンエレクトロニクスは、最大150°C程度、放射線耐性1 kGyまで使用可能であるが、この外側の150°C以上、耐放射線性1 kGy以上の領域に、エレクトロニクスが新しく開拓すべき領域が広がっている。このフロンティアには、最先端科学である (1) 金星探査なども含む宇宙探査、(2) 高エネルギー物理を支える加速器、(3) ITER国際熱核融合実験炉などへの応用も含まれる。

●シリコンカーバイド (SiC) 半導体集積回路

シリコンカーバイド (SiC) はシリコンと炭素が1:1の割合で結合した化合物であり、半導体の物性で重要なエネルギーバンドギャップは3.26 eV (4H-SiC) をもつ、ワイドバンドギャップ半導体である。大電力を制御するためのパワー半導体デバイスとして使われ始めている。このSiC半導体デバイスはワイドバンドギャップという物性から、高温でも制御可能であり、また放射線にも強い。この特性を生かして、本研究では高温や放射線環境下でも駆動可能なSiC半導体集積回路の研究を推進している (図2)。
パワー半導体デバイスでのトランジスタはN型トランジスタ (nMOSFET) のみであるが、集積回路ではN型とP型の両方を使用し、CMOS集積回路とすることが望ましい。しかしSiCではこれまでP型トランジスタ (pMOSFET) の研究はあまりなされていない。また他方、500°Cまでの高温動作を行うためには、SiCのみでなく、集積回路中の電極や金属配線等でも長時間の動作信頼性が必要である。本研究では以上のような材料・プロセスからデバイス・回路の研究を基礎から応用まで包括的に行う。

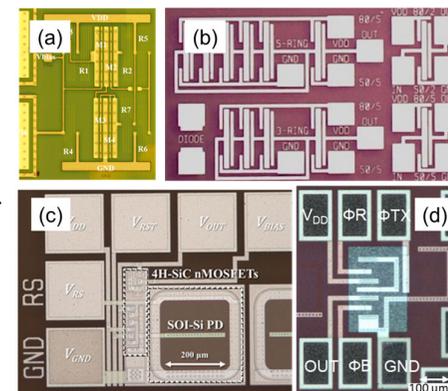


図2 本研究チームによるSiC集積回路の例：(a) SiC差動増幅回路 (500°C駆動可)、(b) SiC CMOS集積回路、SiC/Si-SOIハイブリッド型CMOSイメージセンサ・アクティブピクセルセンサ。フルSiC CMOSイメージセンサ・アクティブピクセルセンサ。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●SiCトランジスタ性能向上のためのデバイス・プロセス物理の研究

SiC CMOS集積回路ではpMOSFETの高い閾値電圧が問題である。閾値電圧の低減に対して、ゲート酸化膜形成後に水蒸気を導入した加熱処理が有効であることが知られる。しかし放射線照射および高温駆動にはこの処理を行っても閾値電圧が上昇する。この物理を明らかにし、新しい閾値電圧制御の研究を行う。

●高温長時間信頼性確保のためのマイクロ・ナノ材料科学

500°Cでの信頼使用に耐える金属シリサイド/SiC電極の研究などを行う。SiC上の金属電極として、NiシリサイドとNbカーバイドによる合金を形成することで界面・表面での炭素凝集を抑制している。しかし500°Cでの長時間動作信頼性評価では特殊なプラズマ照射を行ったサンプルのみ低抵抗を保つ。このメカニズムを明らかにし、各PMOS/NMOSでのオーミック抵抗低減と高温信頼性向上を行う。

●デバイスの耐放射線構造の研究

SiCトランジスタへの放射線照射効果の研究を進め、より耐放射線性の高いトランジスタ構造の研究を行う。

●SiC CMOS集積回路の研究

SiC CMOS集積回路の各種性能向上のもと、極限環境用マイクロプロセッサなどの研究を行う。特に大規模回路の設計のためには、各デバイスのデバイス・パラメータ抽出を行う。SiCデバイスは集積回路デバイスとしては黎明期にあり、材料・プロセスからデバイス集積化まで一貫して研究してこそ、これが達成可能となる。

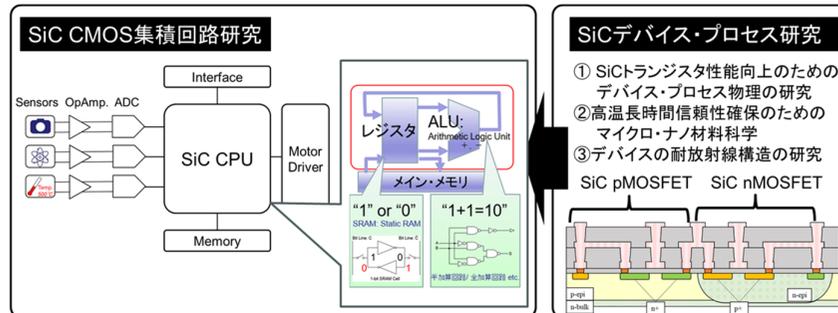


図3 本研究で行うSiCデバイス・プロセス研究とSiC CMOS集積回路研究。