

極低温動作 MOSFET の界面特性についての 実験的研究

2025 年 4 月

下方駿佑

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	㊦ 乙 第	号	氏 名	下方駿佑
主 論 文 題 名 : 極低温動作 MOSFET の界面特性についての実験的研究				
(内容の要旨) 量子コンピュータは特定の問題について高速な計算が可能であり注目されている。誤り耐性のある量子コンピュータには百万個超の量子ビットの集積が必要であり、量子ビットの高集積化が重要な課題である。集積化が期待されている超伝導素子やシリコン素子を用いた量子ビットの動作温度は数ケルビンから数ミリケルビンであり、希釈冷凍機が動作に必要となるが、現行の制御方式は室温に置かれた制御装置から多数の配線を介して行われており、集積化に伴い配線を介した熱流入が問題となる。そこで制御機能を集積回路化し、冷凍機内数ケルビンステージで動作させるクライオ CMOS 技術が注目されている。高性能なクライオ CMOS 回路の設計製造には能動素子である MOSFET の極低温動作の理解・高性能化が求められる。近年の研究から、極低温での基本特性はシリコンのバンドギャップ端に存在するバンド端準位の影響を強く受けることがわかってきた。このバンド端準位の起源については未だ議論中ではあるが、基本特性に与える影響が明らかにされてきている。一方、極低温下での信頼性についての議論はまだ十分に議論されていない。特にホットキャリア効果は温度低下で増加するため、極低温動作で深刻となる。本研究では極低温下でのホットキャリア効果の機構の理解とその対策案について実験的に検討を行った。 本論文は 6 章から構成される。第 1 章で、研究背景と本研究の位置づけを示す。第 2 章では実験方法を説明する。第 3 章では極低温でのホットキャリア注入が議論され、極低温下でのホットキャリア劣化は、バンド端準位の密度増大に起因することが示される。第 4 章では、極低温下における重水素アニールの効果を検証し、重水素アニールが極低温下でのホットキャリア劣化を低減することを実験的に示した。また、ホットキャリア注入後のしきい値電圧の温度依存性から、バンド端準位の発生がダングリングボンド欠陥の発生と関連していることが示される。第 5 章では、バンド端準位に対する高圧水素アニールの効果を議論し、モデルを用いた定量的な解析により、高圧水素アニールがバンド端準位の準位密度を低減することが示される。第 3 章から第 5 章の結果は、バンド端準位が Si/酸化膜界面の品質に依存し、ダングリングボンド欠陥と密接な関係にあることを実験的に明らかにした。第 6 章ではまとめと今後の展望を示す。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	SHITAKATA, Shunsuke
Thesis Title Experimental study of interface engineering in Si MOSFETs at cryogenic temperatures			
Thesis Summary Quantum computers are highly attractive because of their ability to solve several important problems faster. Increasing the number of quantum bits (qubits) is necessary to realize a fault-tolerant quantum computer. In many cases, qubits are placed in a dilution refrigerator. Cryo-CMOS, which operates integrated circuits to control and read out the state of the qubits at a few-Kelvin stage in the refrigerator, is considered promising for reducing heat inflow from room temperature via cables. Consequently, understanding MOSFET operation at cryogenic temperatures is essential. Recent studies have revealed that band-edge states, located near the band edge, significantly affect cryogenic characteristics. Although the origin of these band-edge states remains under discussion, their impact on current-voltage characteristics has been clarified. On the other hand, reliability at cryogenic temperatures has not been sufficiently explored. This is especially important because the hot carrier effect increases as temperature decreases, posing a critical issue for cryo-CMOS circuits. In this study, I experimentally investigated the mechanism of hot carrier degradation at cryogenic temperatures and proposed countermeasures. This thesis consists of six chapters. Chapter 1 introduces the background and scope of this study. Chapter 2 explains the experimental methods. Chapter 3 discusses hot carrier degradation at cryogenic temperatures and suggests that this degradation originates from the generation of band-edge states. Chapter 4 examines the effect of deuterium annealing at cryogenic temperatures and demonstrates experimentally that it reduces hot carrier degradation. Furthermore, the generation of band-edge states is shown to be related to the formation of dangling bond defects. Chapter 5 discusses the effect of high-pressure hydrogen annealing on band-edge states. Quantitative analysis using models shows that high-pressure hydrogen annealing reduces the density of band-edge states. The results from Chapters 3 to 5 experimentally demonstrate that band-edge states depend on the quality of the Si/oxide interface and are closely related to dangling bond defects. Finally, Chapter 6 provides a summary and prospects.			