The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高移動度ゲルマニウムデバイスのMOS界面評価とその制御に関する研究
Author(s)	小川, 慎吾
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61788
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　小　川　慎　吾　）	
論文題名	高移動度ゲルマニウムデバイスのMOS界面評価とその制御に関する研究

論文内容の要旨

本論文は、金属－酸化膜－半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）のチャネルを現在主流のシリコン（Si）から高移動度材料であるゲルマニウム（Ge）に置き換えた高性能MOSFETを実現するために、Geの酸化絶縁膜であるGeO_2膜およびGeO_2膜がスタックされたMOS界面を高品質化することを目指した研究である。Siをチャネルとする MOSFETは、長きに渡り微細化することで高性能化を推進してきたが、近い将来、微細化の物理的な限界を迎えると言われている。微細化に頼らない新しい技術としてGeをチャネルとするMOSFETを実用化するには、Ge上に高品質な絶縁膜を形成する必要があるが、Siの酸化絶縁膜であるSiO_2膜が極めて安定な性質を有する一方で、Ge上のGeO_2膜は熱的に不安定であり、かつ大気下で劣化するなど脆弱な性質を有するため、高い信頼性が要求されるMOSFETの実用化を阻んでいる。そこで本研究では、GeO_2膜およびGeO_2膜がスタックされたMOS界面の高品質化と電気特性改善の指針を得るために、GeO_2膜そのものの性質を理解すること、およびMOS構造の界面反応メカニズムを明らかにすること、さらにそれらの物理現象がMOSキャパシタの電気特性に及ぼす影響を総合的に把握することを目的として研究を進めた。本論文は、序論（第1章）から総括（第5章）まで5章の構成である。以下、本論文の内容を要約する。

第1章では研究の背景、Ge-MOS構造の特徴や課題および課題解決に向けた本研究の目的を記述した。

第2章では、大気下におけるGeO_2膜の性質を理解することを目的として、GeO_2膜が大気と反応した際の生成物、および大気中からGeO_2膜中に拡散する不純物の種類および量を様々な分析手法を駆使して調べた。その結果、GeO_2膜は大気中において段階的に不純物を吸収する挙動を示し、初期に水分を吸収し、その後、一定の吸収量に達するとGeO_2の変性を伴って有機物などを吸収する性質を有することがわかった。中でも大気曝露初期、水分に由来する水素がGeO_2膜中を急速に拡散し、GeO_2/Ge界面付近に蓄積する性質があること、さらに不純物水素の低減が電気特性改善に重要であることを明らかにした。

第3章では、GeO_2膜上に金属電極を形成した際の金属電極/GeO_2界面の反応挙動の理解と制御に関する研究を行った。不活性な性質を有するAu電極を形成した場合はAu/GeO_2界面の顕著な反応は起きないが、比較的反応性が高いAlを電極として形成するとAl/GeO_2界面で反応が起き、Alの酸化とGeO_2の還元およびGe-Al合金が形成されることが分かった。この界面反応によりMOSキャパシタの絶縁特性は著しく劣化することを確認した。また、放射光の硬X線を活用した硬X線光電子分光法を適用し、金属電極（約15 nm）形成後の金属電極/GeO_2界面を非破壊で評価する技術を導入し、得られた結果から、Al電極形成前にGeO_2膜表面を窒化すること、または極薄のAl_2O_3膜（約1 nm）を成膜しGeO_2膜表面を保護することでAl/GeO_2界面の反応を制御できることを実証した。

第4章では、GeO_2膜上にHfO_2膜を成膜した際のHfO_2/GeO_2界面反応の理解と制御を進めた。HfO_2膜中の酸素の拡散を評価するために、GeO_2膜を酸素の同位体である重酸素（$^{18}O_2$）で形成し、その後HfO_2膜を通常の酸素（$^{16}O_2$）で形成した$Hf^{16}O_2/Ge^{18}O_2$/Geスタック構造を作製し、HfO_2膜中の^{18}Oの分布を評価する技術を構築した。作製した試料に対して真空アニール処理を施すとGeO_2膜からHfO_2膜中にGeおよび酸素が拡散するが、両者の拡散挙動は全く異なり、電気特性を劣化させる要因がGeの拡散にあることを証明した。HfO_2膜中へのGeの拡散は、HfO_2/GeO_2界面への極薄AlO_x膜の挿入により制御できること、さらに得られた結果に基づきプロセスを最適化することで良好な電気特性と耐熱性が得られることも示した。

第5章は本論文のまとめであり、GeO_2膜およびMOS界面の性質の理解とその性質を考慮した特性改善技術および独自に導入した分析技術について総括した。本論文は、Ge-MOSデバイスの実用化を阻む主要因であり、脆弱な性質を有するGeO_2膜およびGeO_2膜がスタックされたMOS界面の性質を理解し制御することで、Ge-MOSデバイス実用化に向けたMOS構造の高品質化の指針を示したものであり、Ge-MOSFET実現の可能性を広げるものである。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　小川　慎吾　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	渡部　平司
	副 査	教授	高井　義造
	副 査	教授	兼松　泰男
	副 査	教授	大政　健史
	副 査	教授	菊地　和也
	副 査	教授	伊東　忍
	副 査	教授	中山　健一

論文審査の結果の要旨

本論文は、高移動度材料であるゲルマニウム（Ge）をチャネルとする金属－酸化膜－半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）のMOS界面の性質を理解し制御することを目的とした研究である。Siをチャネルとする現在主流のMOSFETの微細化限界を打破する新しい技術として、高移動度Geチャネルの導入に期待が寄せられているが、Geの酸化膜であるGeO_2膜の脆弱な性質が高い信頼性が要求されるMOSFETの実用化を阻んでいる。本論文は、GeO_2膜そのものの性質を理解しMOS構造の界面反応メカニズムを明らかにすることで、界面反応を制御する技術を実証した研究である。本論文は、序論（第1章）から総括（第5章）まで5章の構成である。以下、本論文の内容を要約する。

第1章では研究の背景、Ge-MOS構造の特徴や課題および課題解決に向けた本研究の目的を記述している。第2章では、GeO_2膜が大気と反応した際の生成物、および大気中からGeO_2膜中に拡散する不純物の種類および量を様々な分析手法を駆使して調べている。その結果、GeO_2膜は大気中において段階的に不純物を吸収する挙動を示し、初期に水分を吸収し、その後、一定の吸収量に達するとGeO_2の変性を伴って有機物などを吸収する性質を有することを示している。さらに不純物水素の低減が電気特性改善に重要であることを明らかにしている。

第3章では、GeO_2膜上に金属電極を形成した際の金属電極/GeO_2界面の反応挙動の理解と制御に関する研究を行っている。不活性な性質を有するAu電極を形成した場合はAu/GeO_2界面の顕著な反応は起きないが、比較的反応性が高いAlを電極として形成するとAl/GeO_2界面で反応が起き、Alの酸化とGeO_2の還元およびGe-Al合金が形成されること、さらにこの界面反応によりMOSキャパシタの絶縁特性は著しく劣化することを明らかにしている。また、Al電極形成前にGeO_2膜表面を窒化すること、または極薄のAl_2O_3膜（約1 nm）を成膜しGeO_2膜表面を保護することでAl/GeO_2界面の反応を制御できることを実証している。

第4章では、HfO_2/GeO_2/Geスタック構造における原子拡散を評価するために、酸素の同位体である重酸素（$^{18}O_2$）を用いて$Hf^{16}O_2$/$Ge^{18}O_2$/Geスタック構造を作製し、HfO_2膜中の^{18}Oの分布を評価する技術を構築している。GeO_2膜からHfO_2膜中にGeおよび酸素が拡散するが、両者の拡散挙動は全く異なり、電気特性を劣化させる要因がGeの拡散にあることを証明している。HfO_2膜中へのGeの拡散は、HfO_2/GeO_2界面への極薄AlO_x膜の挿入により制御できること、さらに得られた結果に基づきプロセスを最適化することで良好な電気特性と耐熱性が得られることも示している。第5章で本論文を総括している。

以上のように、本論文はGe-MOSデバイスの実用化を阻む主要因であり、脆弱な性質を有するGeO_2膜およびGeO_2膜がスタックされたMOS界面の性質を理解し制御することで、Ge-MOSデバイス実用化に向けたMOS構造の高品質化の指針を示したものであり、Ge-MOSFET実現の可能性を広げるものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。