

氏 名	趙 明
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2918 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 マ イ ク ロ エ ン ジ ニ ア リ ン グ 専 攻
学位論文題目	Studies on High- <i>k</i> Gate Stacks by High-resolution Rutherford Backscattering Spectroscopy (高分解能ラザフォード後方散乱法による高誘電率ゲートスタック構造に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 木 村 健 二 教 授 斧 高 一 教 授 立 花 明 知

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ (MOSFET) のゲート絶縁膜としての使用が始まりつつある Hf 系の高誘電率材料を用いたゲートスタック構造のうちで、最も典型的な $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 構造に関して、 SiO_2 界面層の制御を目的として、熱処理時におけるシリコンおよび酸素の挙動を高分解能ラザフォード後方散乱法を用いて明らかにしたものであり、6章からなっている。

第1章は序論であり、MOSFETにおいて高誘電率ゲートスタック構造が必要となってきた背景を簡潔に述べるとともに、高誘電率ゲートスタック構造に必要なとされる要件とそれを達成するための技術課題を説明している。また、この技術課題を解決するために、優れた分析法が必要とされることを述べている。

第2章では、ラザフォード後方散乱法の原理を弾性散乱の運動学をもとに、散乱断面積、阻止能、エネルギー・ロス・ストラグリング等の物理概念を用いて説明し、その特徴を明らかにしている。また、本研究で使用した高分解能ラザフォード後方散乱法の装置に関して、その構成要素である加速器、超高真空散乱槽、磁場型のエネルギー分析器、四重極レンズ、1次元位置検出器、計測回路等に関してそれらの特徴を詳細に説明するとともに、第6章で詳述する飛行時間計測型の新しい高分解能ラザフォード後方散乱法の原理と装置の概要を簡潔に述べている。さらに、本研究で試料として使用した $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ゲートスタック構造の作成方法と、この試料の熱処理の方法を説明している。

第3章では、 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 構造を酸素雰囲気中で種々の温度で熱処理した時の変化を、高分解能ラザフォード後方散乱法により観察した結果を述べている。酸素雰囲気中で 500°C 以上の温度で熱処理することにより、従来よく知られていた熱処理に伴う SiO_2 界面層の成長を観測するとともに、 HfO_2 の表面に SiO_2 の極薄膜層が現れることを発見した。観測された表面の SiO_2 が HfO_2 に生じたピンホールに起因したものでないことを、原子間力顕微鏡による試料表面の観察により確認している。次に、種々の条件で熱処理を行いその結果を詳しく検討し、この表面の SiO_2 層と SiO_2 界面層の成長の間に強い相関があることを見出している。また、超高真空中の熱処理の実験を行い、酸素雰囲気中の熱処理と同じ温度、同じ時間の熱処理を行ったにもかかわらず、超高真空中の熱処理では、 SiO_2 界面層の成長が生じず、また表面の SiO_2 層も生じないことを確認している。以上の結果から、表面の SiO_2 層の形成が SiO_2 界面層の成長に伴って生じていることを明確に示した。また SiO_2 界面層の成長量と表面の SiO_2 層の厚さの比較から、4個のSi原子の酸化に伴い、ほぼ1個のSi原子が SiO_2/Si 界面から放出され HfO_2 の表面に現れることを明らかにした。この結果は、Si酸化時に SiO_2/Si 界面に生じるひずみを緩和するため、 SiO_2/Si 界面から SiO_2 層中へSiが放出されるという最近の理論的研究の結果とよく一致しており、この理論的研究の結果を初めて実証したものである。

第4章では、高分解能ラザフォード後方散乱法が酸素16と酸素18の2つの同位体を区別して測定できることに着目し、酸素18ガス中で熱処理した $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 構造を高分解能ラザフォード後方散乱法により測定し、 SiO_2 界面層成長時の酸素の

挙動を明らかにしている。酸素18ガス中で熱処理したHfO₂/SiO₂/Si構造中の酸素18の深さ分布は、HfO₂層中ではほぼ一様な分布を示しており、酸素のHfO₂中の拡散が非常に早いことを見出した。また、SiO₂界面層中では酸素18はSiとの界面には到達しておらず、酸素の拡散が原子状酸素の交換過程で生じていることを明らかにしている。次に、SiO₂界面層の初期成長速度の熱処理温度依存性を測定して、その活性化エネルギーが約0.6eVという結果を得て、上記の原子状酸素の交換過程と整合していることを確認している。

第5章では、HfO₂/SiO₂/Si構造中のSiO₂界面層の厚さの制御を目的として、HfO₂/SiO₂/Si構造上に薄いチタン層を蒸着して真空中で330℃の熱処理を行い、チタンの酸素ゲッターリング効果によりSiO₂界面層を減少する方法を検討している。この方法により、SiO₂界面層の厚さを減少できることを確認している。さらに、SiO₂界面層の減少量を増加させるために、より厚いチタン層の蒸着と熱処理を行ったところ界面層を大幅に減少できたが、HfO₂層の組成も変化して酸素が欠乏することを明らかにしている。

第6章では、散乱イオンのエネルギーと角度分布を同時に測定することが可能な、飛行時間型エネルギー分析装置の開発に関して詳述している。装置の設計・製作を行い、その性能を評価して、ほぼ理論値通りのエネルギー分解能と深さ分解能が達成できていることを確認している。また散乱角度分布の測定によって、ブロッキング測定が可能であることを、Si単結晶を用いて実証している。これらの結果から、開発した飛行時間型エネルギー分析装置が、高誘電率エピタキシャル膜等の単結晶薄膜の解析に有効に利用できることを示している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ（MOSFET）のゲート絶縁膜としての使用が始まりつつあるHf系の高誘電率ゲートスタック構造のうちで、最も典型的な構造であるHfO₂/SiO₂/Si構造の、熱処理におけるシリコンおよび酸素の挙動を高分解能ラザフォード後方散乱法を用いて明らかにしたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. HfO₂/SiO₂/Si高誘電率ゲートスタック構造を酸素雰囲気中で500℃以上の温度で熱処理した際に、従来知られていたSiO₂界面層の成長以外に、HfO₂表面にSiO₂の極薄膜が生じることを見出した。種々の条件下の熱処理実験の結果を検討した結果、表面SiO₂層の形成とSiO₂界面層の成長に強い相関があることを明らかにした。また、SiO₂/Si界面において4個のSi原子の酸化に伴い、ほぼ1個のSi原子が表面に現れることがわかった。この結果は、Si酸化時にSiO₂/Si界面に生じるひずみを緩和するため、SiO₂/Si界面からSiO₂層中へSiが放出されるという理論研究の結果を初めて実証したものである。
2. HfO₂/SiO₂/Si高誘電率ゲートスタック構造を酸素18の雰囲気中で熱処理したとき、試料中に取り込まれた酸素18の深さ分布を測定することにより、酸素の拡散が原子状酸素の交換過程により生じていることを明らかにした。
3. HfO₂/SiO₂/Si上にチタンの薄膜を蒸着し、真空中で330℃の熱処理を行ったとき、SiO₂界面層が減少する現象を高分解能ラザフォード後方散乱法によりその場観察した。その結果、チタンの膜厚の増加に伴いSiO₂界面層の減少量が増加するとともに、HfO₂中の酸素が減少することを見出した。

以上のように、本論文はMOSFETに使用されるゲートスタック構造の熱処理時のシリコンおよび酸素の挙動を明らかにしたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。