

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760222

研究課題名（和文）

NBTI の解明のため超薄膜金属を用いた MOS 構造内の元素拡散のその場観察

研究課題名（英文）

In situ observation of MOS structure with an ultra thin metal gate for clarification of NBTI mechanism

研究代表者

趙 明 (Zhao Ming)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：50512224

研究成果の概要（和文）：

スパッタおよび 50eV イオン照射を用い、厚さ 3nm の均一金属膜を作製した。その後、ERDA の手法を用い CMOS 用の汎用 Si 基板に H が含まれることを見だし、従来の NBTI 理論に関する 1 つの仮説を実験証明ができた。また、260°C 以上の設定温度で、H が Si 基板外に拡散することを観測し、拡散律速論と呼ばれるモデルが NBTI に適用できることを証明した。この結果を受け、CMOS の製造パラメータを最適化するモデルの構築が可能になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

The 3-nm-thicked continuous metal film has been successfully fabricated by sputtering deposition and 50eV ion irradiation. Therefore, it is possible to prove one of the theories of the mechanism of NBTI by using ERDA to study the H concentration in the Si substrate of CMOS. We have observed that the H can out diffuse in Si substrate at 260°C. This result indicates that 'diffusion-limited' model is more suitable for explain the NBTI mechanism. This result can be used for the optimization of the fabrication parameters of CMOS.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子・電気材料工学

キーワード：作成・評価技術

1. 研究開始当初の背景

半導体製造超微細化することを受け、

半導体材料の導電層や絶縁層などの厚さを継続的に減少する方向に進んでいる。しかし、超微細化された絶縁層は、温度の影響を受けやすく、負バイアス温度不安定性 (NBTI) とよばれる劣化により電子デバイスの寿命を制限していることが分かった。特に、NBTI が高温で負のゲート電圧を使用すると、p-MOS デバイス内発生し、実験によるアブソルート電流 I_{Dsat} の低下と閾値電圧 V_T の増加することが分かった。

従来研究には、NBTI の成因には主な2つの仮説がある。

- (1) 拡散律速論: H^+ が SiO_2/Si 界面へ拡散し、 $Si-H$ によって吸収し、反応結合により H_2 と懸垂 $Si-$ を生成する。
- (2) 反応限定論: 電子穴が SiO_2/Si の界面に拡散し、 $Si-H$ と中性水の反応により H^+ を生成する。

しかし、この2つの仮説は NBTI ストレス時、決定的な要素拡散を実験で観測できなかつたため、証明できなかつた。

一方、 V_T のシフトが負バイアスの消えたときに回復できることが分かっている。その要素拡散と V_T シフトの回復を観測するため、デバイスが破壊されない検査方法が必要である。そこで、本研究には、観測体としてデバイスのインテグリティをそのまま維持できる高分解能ラザフォード後方散乱分光法 (RBS) (重元素を検出するため) と高分解能弾性反跳検出分析 (ERDA) (軽元素を検出するため) を用い、NBTI 成因を解明することを行う。

我々の過去の研究で、高分解能 RBS を用いて、多層構造内の要素の拡散のその場観察のために実機検証ができることを証明した。具体的には、高分解能 RBS により、熱処理しながら、 $Ti/HfO_2/SiO_2/Si$

スタック中の Si と O の拡散メカニズムを考察した。この観測のメカニズムより、RBS が従来の NBTI の仮説に証拠を提供することができる実験手法と見られる。

しかし、良好なオーム接触のため、観測体の厚さを数百ナノ以下にすることが RBS と ERDA の使用制限である。半導体メタルゲートの厚さが数百ナノより規模が大きいため、RBS と ERDA の従来使用手法では、精度の低下する可能性が高いと予想される。

高分解能 RBS と ERDA の厚さの問題を解決するために、極薄の連続 Pd 膜の利用を考えた。近年の研究で、低エネルギーイオン照射とスパッタ蒸着法により極薄の連続 Pd 膜達成され、表面抵抗率が Ar^+ 照射後 20 回以上減少できることが分かった。

この極薄の連続 Pd 膜が半導体のメタル層を想定し、RBS と ERDA の高精度分析性能を利用できるオーム接触を作成し、NBTI 解明の実験を構築する。

2. 研究の目的

- 1) High-k MOS 構造は負のバイアスである、移動する要素の種類を解明する。
- 2) High-k MOS 構造の要素分布及び負のバイアス条件で元素の拡散へ、温度および活性化アニールの影響を解明する。

3. 研究の方法

1) 超薄型連続金属膜の作製

スパッタ蒸着法を用い厚さ 3nm の金属膜を均一に蒸着するため、 60° の入射角度の 50 eV の Ar^+ イオン照射が行えるよう装置を改造しました。また、この間に、電界放射走査電子顕微鏡 (FE-SEM) による観察および電気抵抗測定により、イオン照射

のパラメータの最適化を行った。

2) high-*k* 薄膜の作製

本研究では、スパッタ 蒸着法を用いて作製した HfO₂ ゲート絶縁膜層 に対し、high-*k* 材料と Si の界面のストレスの影響に関して測定実験を行った。RBS 実験結果から、スパッタ 蒸着法を用いて均一な 3nm 厚の HfO₂ ゲート膜を調製することが出来ることを示した。

3) 負のバイアス条件で、その場 RBS と ERDA の分析

260°C に、高分解能 RBS と ERDA によって、複数の薄膜中の H の分布を検討した。400 keV 程度の He⁺ イオンを用いる高分解能 RBS においては、散乱粒子のうちで He⁺ イオンのみを測定すれば、定量性良く組成分析が可能となることを保証している。高分解能 ERD では、400 eV の C⁺ イオンを試料に照射し、前方に反跳されて放出された試料構成原子イオンのエネルギーを精密に測定して、H 元素の深さ分布を求めている。

4. 研究成果

1) 金属膜の連続性を改善

電界放射走査電子顕微鏡によって、低エネルギー Ar⁺ イオン照射した金属膜の連続性が改善することを確認した。スパッタ蒸着法を用い厚さ 3nm の金属膜を均一に蒸着するため、60°の入射角の 50 eV の Ar⁺ イオン照射が行えるよう装置を改造し、薄膜の均一性の向上を達成することができた。

図 1 に示す。

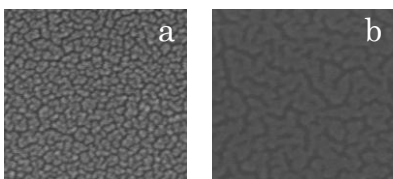


Fig.1. 厚さ 3nm の Pd 膜 a) 照射前; b) 照射後。

2) 蒸着した複数の薄膜中に H 分布

Pd と Au の 2 種類金属膜の蒸着により、Si 基板中の H を導入することを観測した。Pd 膜の影響はもっと強い。図 2 に示す。

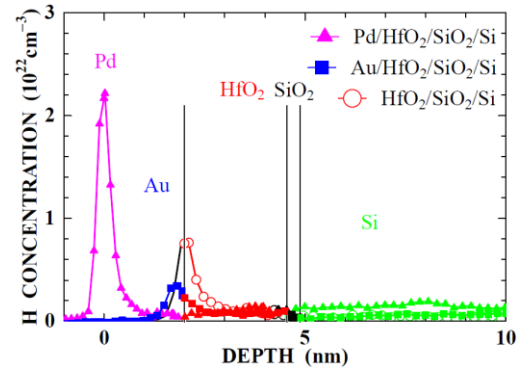


Fig.2. The H⁺ depth profiles of (▲) Pd(2nm)/HfO₂/SiO₂/Si, (■) Au(0.4nm)/HfO₂/SiO₂/Si and (○) HfO₂(2.6nm)/SiO₂/Si.

3) 負のバイアス条件で元素の拡散

CMOS の特性に影響を及ぼす要因として H の拡散があるが、それが制御できることを示した。その high-*k* 薄膜に、H を導入した CMOS と同じ構造の high-*k* スタックの高温ストレス・テストを行った。260°C 以上の設定温度で、Si 基板の H の濃度が減少することを観測した。この結果から、拡散律速論と呼ばれる仮説が NBTI 発生原因に適用できることを証明した。図 3 に示す。

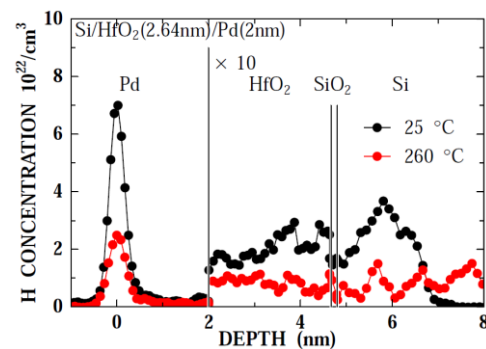


Fig.3. The change of the H⁺ depth profiles in Pd(2nm)/SiO₂/Si due to the 260°C annealing.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕（計 2 件）

① Ming Zhao, Shinji Nagata, Tatsuo Shikama, Aichi Inouye, Shunya Yamamoto, Masahito Yoshikawa, Surface electronic properties of discontinuous Pd films during hydrogen exposure, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, 50巻, 2011年, 01BE08-1~ 01BE08-4.

② Ming Zhao, Shinji Nagata, Tatsuo Shikama, Aichi Inouye, Shunya Yamamoto, Masahito Yoshikawa, Hydrogen Interaction with Pd/SiO₂/Si Rectifying Junction, *Materials Science and Engineering B*, 査読有, 175 巻, 2010 年, 223-228.

〔学会発表〕（計 4 件）

① Ming Zhao, Shinji Nagata, Tatsuo Shikama, Kaoru Nakajima, Motofumi Suzuki, Kenji Kimura, The study on hydrogen performance in high-k stacks by ERDA, 6th International Workshop on High-Resolution Depth Profiling, 査読有, 2011年 6月22日, フランスパリ市.

② Ming Zhao, Shinji Nagata, Tatsuo Shikama, Room Temperature Fabrication of Metal Film by Low Energy Ion Sputtering, イオンビームによる表面介面解析特別研究会, 査読有, 2010年11月3日, 日本名古屋市.

③ Ming Zhao, Shinji Nagata, Tatsuo Shikama, Room Temperature Fabrication of Continuous Metal Films by low Energy Ar⁺ Irradiation, 日本原子力学会「2010年秋の大会」, 2010年9月15日, 日本札幌市.

④ Ming Zhao, Shinji Nagata, Aichi Inouye, Shunya Yamamoto, Masahito Yoshikawa, Tatsuo Shikama, The Influence of Low Energy Ar⁺ irradiation on the Surface morphology of Metal Thin Films, The 3rd International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, 査読有, 2010年6月2

日, 日本富山市.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
趙 明 (Zhao Ming)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号：50512224

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：