

高移動度 MOSFET 実現に向けた高機能化 High- k /Ge ゲートスタックの界面設計Interface Engineering of High- k /Ge Gate Stacks
for High-mobility Ge-MOSFETs

渡部 平司¹⁾ 秀島 伊織¹⁾ 箕浦 佑也¹⁾ 田中 亮平¹⁾ 細井 卓治¹⁾
 志村 考功¹⁾ 吉越 章隆²⁾ 寺岡 有殿²⁾
 Heiji WATANABE¹⁾ Iori HIDESHIMA¹⁾ Yuya MINOURA¹⁾ Ryohei TANAKA¹⁾ Takuji HOSOI¹⁾
 Takayoshi SHIMURA¹⁾ Akitaka YOSHIGOE²⁾ Yuden TERAOKA²⁾

¹⁾大阪大学 ²⁾原子力機構

高性能ゲルマニウム (Ge) MOSFET の実現には、優れた絶縁性と界面特性を有する高誘電率ゲート絶縁膜 (high- k) 形成プロセスが必要である。Si-MOSFET では Hf 系 high- k 膜が実用化されているが、Ge 基板上に HfO₂ 薄膜を堆積した場合、HfO₂/Ge 界面での GeO_x 界面層の形成と分解、そして HfO₂ 中への Ge 原子の拡散が電気特性劣化を引き起こしてしまう。本研究では、HfO₂/Ge 界面での反応の理解を目的として、Ge 基板上に堆積した極薄金属 Hf の酸化による HfO₂/GeO_x/Ge スタック形成と、その上層への金属電極堆積により起こる構造変化について、大型放射光施設 SPring-8 の BL23SU を用いた光電子分光法により評価した。

キーワード : ゲルマニウム, 高誘電率 (high- k) ゲート絶縁膜, MOSFET, プラズマ酸化

1. 目的

次世代半導体デバイスでは、従来の Si よりも高キャリア移動度を有する Ge をチャネル材料とした金属-酸化膜-半導体 (MOS: Metal-Oxide-Semiconductor) 構造の実現が期待されている。Ge-MOSFET の導入が想定される技術世代では、1 nm 以下の等価 SiO₂ 換算膜厚 (EOT: Equivalent Oxide Thickness) が求められるため、その実現には high- k /Ge ゲートスタック技術が不可欠である。しかしながら、high- k /Ge ゲートスタックにおいて偶発的に起こる GeO_x 界面層の形成とその分解や、high- k 膜中への Ge 原子の拡散といった現象は電気特性を著しく劣化させてしまう [1, 2]。そこで本研究では、HfO₂/Ge スタックにおける上記の現象について、HfO₂ 形成手法および上層に堆積する金属電極の影響を放射光光電子分光により詳細に調査した。

2. 方法

p 型 Ge(100)基板を洗浄し、超高真空中で 500°C、10 分間の表面清浄化処理後、室温で金属 Hf を電子ビーム蒸着により 1 nm 堆積した。続けて、HfO₂ 形成のために減圧酸素雰囲気 (0.4 Pa) 中で 300°C、10 分間の酸化処理を行った。また一部の試料では、同条件で ECR 酸素プラズマの照射を行った。その後、ゲート電極として Pt あるいは Al を 3 nm 成膜した。ゲートスタック中の酸素量を制御するために、以上の工程は全て真空中で連続して行った。作製した試料に対して、SPring-8 内の日本原子力研究開発機構専用軟 X 線ビームライン (BL23SU) に設置された表面反応分析装置を用いて、放射光光電子分光分析 (Synchrotron Radiation Photoelectron Spectroscopy: SR-PES) を行った。なお、入射エネルギーは 900 eV として、Ge 3s、Hf 4f、O 1s、Al 2p、Pt 4d 内殻準位スペクトルを検出した。

3. 結果及び考察

Fig.1 に、high- k 膜形成手法 (減圧酸化とプラズマ酸化) の異なる 2 種類の Pt/HfO₂/Ge 試料、およびプラズマ酸化後で形成した Al/HfO₂/Ge 試料から取得した Ge 3s および Hf 4f スペクトルを示す。Ge 3s スペクトルより、いずれの試料でも Ge 基板成分 (Ge⁰⁺) よりも高結合エネルギー側にピークが観測されており、GeO_x 界面層が形成されていることがわかる。減圧酸化試料では、Ge⁰⁺成分よりも低結合エネルギー側にもピークの存在が確認でき、Hf 4f スペクトルにも HfO₂ (Hf⁴⁺) とは異なる金属的な結合の存在が見られたことから、Hf-Ge 結合が形成されたと考えられる (Fig.1(a), (b))。一方でプラズマ酸化試料では、Ge 3s、Hf 4f スペクトルのどちらにもそのようなピークは見られなかったことから、Hf-Ge 結合の存在し

ない Pt/HfO₂/GeO_x/Ge 構造となっていることが示唆された (Fig.1(c), (d))。金属 Hf を Ge に堆積しただけの試料でも Hf-Ge 結合が観測されたことから、以上の結果は、Hf-Ge 結合を分断してそれぞれ Hf-O および Ge-O 結合を形成するには、酸化力の強いプラズマ酸化のような手法が必要であることを意味している。一方、プラズマ酸化により形成した HfO₂/GeO_x/Ge 構造であっても上層に Al 電極を堆積した場合、Hf 4f スペクトルは Pt 電極試料と一致したのに対して、Ge 3s スペクトルの GeO_x ピーク強度の減少が見られた。同時に Ge⁰⁺成分よりも低結合エネルギー側にピークが生じていることから、Al 電極は HfO₂ 層を間に挟んでいても GeO_x 界面層を還元し、Al-Ge 結合を形成したと考えられる。

さらに、これらの試料について MOS キャパシタを作製し、電流-電圧 (I-V) 特性と容量-電圧 (C-V) 特性を評価した (Fig. 2)。Hf-Ge 結合が存在する減圧酸化試料はほとんど絶縁性を有していないことがわかる。一方で、プラズマ酸化で HfO₂ 層を形成した Al 電極試料は、Pt 電極試料よりもリーク電流が多く、蓄積容量の減少を示した。これらは HfO₂ 膜の絶縁性劣化および比誘電率低下を示唆しており、Hf-Ge 結合や Al-Ge 結合といったジャーマニド形成を回避することが良質な high-*k*/Ge ゲートスタックの実現に重要であると結論できる[3]。

今後は、metal/high-*k*/Ge スタックの耐熱性評価および界面構造の詳細な解析を進め、極薄 EOT と優れた界面特性を両立する high-*k*/Ge ゲートスタック作製プロセスの確立を目指す。

4. 引用(参照)文献等

- [1] K. Kita *et al.*, Appl. Surf. Sci. 254 (2008) 6100.
- [2] M. Caymax *et al.*, Mater. Sci. Eng. B 135 (2006) 256.
- [3] T. Hosoi *et al.*, Microelectronic Engineering, *in press*.

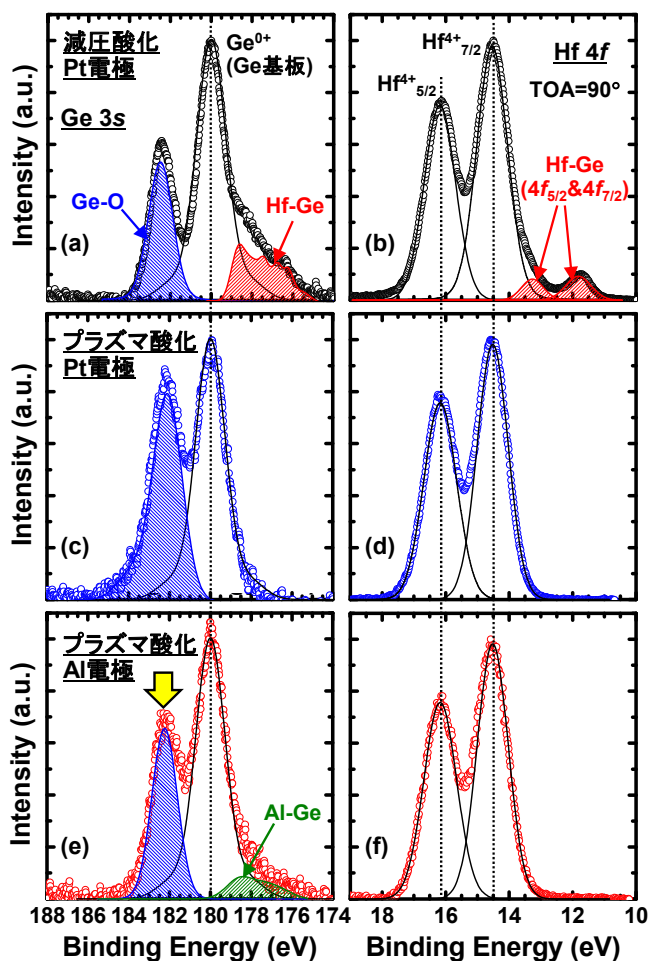


Fig. 1 (a, c, and e) Ge 3s and (b, d, and f) Hf 4f core-level spectra taken from as-fabricated Pt- and Al-gate HfO₂/GeO_x/Ge stacks formed by low-pressure oxidation (LPO) or ECR plasma-assisted oxidation (ECR). Photoelectron takeoff angle was 90°.

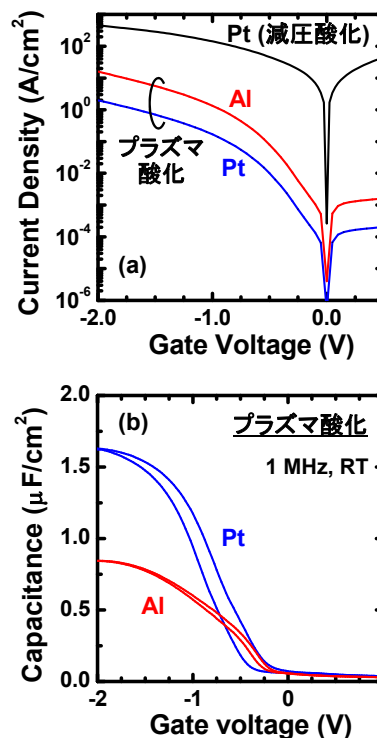


Fig. 2 (a) I-V and (b) high frequency C-V characteristics of the metal/high-*k*/Ge gate stacks in Fig. 1.