The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Design of Higher-k Gate Dielectrics and Effective Work Function Control by Interface Dipole Formation
Author(s)	有村, 拓晃
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/58393
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

【54】

氏　　名	有　村　拓　晃（あり むら ひろ あき）
博士の専攻分野の名称	博　士（工　学）
学　位　記　番　号	第　２４５３９　号
学位授与年月日	平成23年3月25日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当 工学研究科生命先端工学専攻
学　位　論　文　名	Design of Higher-k Gate Dielectrics and Effective Work Function Control by Interface Dipole Formation （超高誘電率ゲート絶縁膜の設計と界面ダイポール形成による実効仕事関数制御）
論　文　審　査　委　員	（主査） 教　授　渡部　平司 （副査） 教　授　金谷　茂則　　教　授　福住　俊一　　教　授　宮田　幹二 教　授　菊地　和也　　教　授　伊東　　忍　　教　授　高井　義造 教　授　伊東　一良　　教　授　兼松　泰男

論文内容の要旨

現代の高度情報化社会の根底を支える大規模集積回路は、金属－酸化膜－半導体電界効果型トランジスタ(MOSFET)の微細化により性能向上および高集積化を果たしてきた。従来のSiO_2ゲート絶縁膜が薄膜化限界を迎えたことで、新たな絶縁膜材料として高誘電率(High-*k*)絶縁膜が導入され始めている。しかしHigh-*k*絶縁膜を高温熱履歴がかかる従来のGate-Firstプロセスに適用すると閾値電圧の制御が困難となる。本研究の目的は現世代のHf系High-*k*膜より誘電率の高い(Higher-*k*)ゲート絶縁膜を設計し、酸化膜換算膜厚(EOT)の薄膜化を行うとともに、Higher-*k*/SiO_2界面に生じる界面ダイポールを制御することで、ゲート電極の実効仕事関数を変調して低閾値電圧化の指針を得ることである。第1章ではこれらの研究背景を述べ、続く第2章ではHigher-*k*膜の実現に焦点を絞りHfSiO膜に極めて誘電率の高いTiO_2層を積層した絶縁膜構造を検討した。その結果、1nmを下回るEOT領域で電気特性に優れたHigher-*k*膜を実現したが、熱安定性に欠けるとともに実効仕事関数の制御は課題として残った。そこで第3章では下地SiO_2層との界面にダイポールを形成することで実効仕事関数の変調が期待されるLa添加High-*k*膜に着目した。La系酸化物は吸湿現象による特性劣化が課題であるため、真空一貫プロセスでHfSiO膜にLaを添加することで、優れた電気特性を達成し、La起因界面ダイポールの形成によるnMOS側への実効仕事関数変調にも成功した。第4章ではこの実効仕事関数制御をさらにn/pMOS両側へと拡大するため、La-Al-O膜を検討した。AlがLaとは逆向きの界面ダイポールを形成するため、LaとAlの原子比率を制御することでn/pMOS両側へのより広範な実効仕事関数変調を達成した。また、LaおよびAl酸化物の誘電率およびバンドギャップは大きく異なるため、La/Al組成によりLa-Al-O膜のバンドギャップおよび誘電率の変調に成功した。このとき界面ダイポールの形成に伴いエネルギーバンド構造も変化するため、これら全てを考慮した上でリーク電流低減の観点から最適なLa/Al組成(La/(La+Al)=0.75)を見出した。この最適La-Al-O膜により、0.74nmという極薄のEOT領域で現行のHfO_2を上回る絶縁特性をGate-Firstプロセスで達成した。第5章ではフェムト秒ポンプ／プローブ光電子分光法を用いることで、電気特性評価ではこれまで困難であった低温領域の界面ダイポール挙動を観測した。これにより、300℃以下におけるLa起因界面ダイポールの活性化現象、およびAl起因界面ダイポールの実効仕事関数変調機構を初めて明らかにした。以上の結果より、Gate-FirstプロセスでのHigher-*k*膜導入および界面ダイポール制御の指針を述べ、第6章で総括とした。

論文審査の結果の要旨

現代の高度情報化社会を支える大規模集積回路は、金属－酸化膜－半導体電界効果型トランジスタ(MOSFET)の微細化により性能向上および高集積化を果たしてきた。従来の SiO_2 ゲート絶縁膜が薄膜化限界を迎えたことで、新たな絶縁膜材料として高誘電率(High-k)絶縁膜が導入され始めている。しかし High-k 絶縁膜を高温熱履歴がかかる従来の Gate-First プロセスに適用すると閾値電圧の制御が困難となる。そこで本論文では、現世代の Hf 系 High-k 膜より誘電率の高い(Higher-k)ゲート絶縁膜を設計し、酸化膜換算膜厚(EOT)の薄膜化を行うとともに、Higher-k/SiO_2 界面に生じる界面ダイポールを制御し、低閾値電圧化の指針を示している。

第 1 章では、EOT 薄膜化の必要性と Metal/High-k ゲートスタックで課題とされる実効的な仕事関数の制御について述べている。続く第 2 章では Higher-k 膜の実現に焦点を絞り、HfSiO 膜に誘電率の極めて高い TiO_2 層を積層した絶縁膜構造を検討している。その結果、1nm を下回る EOT 領域で電気特性に優れた Higher-k 膜を実現している。第 3 章では電気特性の向上に加えて実効仕事関数も制御するため、下地 SiO_2 層との界面にダイポールを形成することで実効仕事関数の変調が期待される La 添加 High-k 膜に着目している。La 系酸化物は吸湿現象による特性劣化が課題であるため、真空一貫プロセスで HfSiO 膜に La を添加することで、優れた電気特性を達成し、La 起因の界面ダイポール形成による nMOS 側への実効仕事関数変調にも成功している。第 4 章ではこの実効仕事関数制御をさらに n/pMOS 両側へと拡大するため、La-Al-O 膜を検討している。Al が La とは逆向きの界面ダイポールを形成するため、La と Al の原子比率を制御することで n/pMOS 両側へのより広範な実効仕事関数変調を達成している。また、La および Al 酸化物の誘電率およびバンドギャップが大きく異なることを利用し、La/Al 組成制御による La-Al-O 膜のバンドギャップおよび誘電率の変調にも成功している。このとき界面ダイポールの形成に伴いエネルギーバンド構造も変化するため、これら全てを考慮した上でリーク電流低減の観点から最適な La/Al 組成(La/(La+Al)=0.75)を見出している。この最適 La-Al-O 膜により、0.74nm という極薄の EOT 領域で現行の HfO_2 を上回る絶縁特性を Gate-First プロセスで達成している。これは Gate-First プロセスで作製した非 Hf 系 Higher-k 膜としては世界最高性能である。第 5 章ではフェムト秒ポンプ／プローブ光電子分光法を用いることで、電気特性評価ではこれまで困難であった低温領域の界面ダイポール挙動を観測している。これにより、300℃以下における La 起因界面ダイポールの活性化現象、および Al 起因界面ダイポールの実効仕事関数変調機構を初めて明らかにした。これらの結果より、Gate-First プロセスでの Higher-k 膜導入および界面ダイポール制御の指針を述べ、第 6 章で総括としている。

以上のように、本論文に示された研究成果は、Metal/Higher-k ゲートスタックとして世界最高水準の電気特性に達し、高性能低閾値電圧デバイスの実現の鍵となる界面ダイポールの温度依存性についても世界で初めて明らかにしている。これらは次世代 LSI デバイスの実現に直結する知見であり、よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。