

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年 3月 12日現在

研究種目：基盤研究 (B)
研究期間：2007 ～ 2008
課題番号：19360164
研究課題名 (和文) 原子層成長ゲート絶縁膜を有する Ge 高信頼性トランジスタの研究
研究課題名 (英文) Research of reliable Ge transistor having atomic layer deposited gate dielectrics
研究代表者 中島 安理 (NAKAJIMA ANRI)
広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研究所・准教授
研究者番号：70304459

研究成果の概要：

tetrakis diethylmethylamino hafnium (TDEAH)と H₂O の交互照射を用いた Ge 基板上への HfO₂ の原子層成長 (ALD) 法の確立を行った。ラザフォード後方散乱による組成分析、原子間力顕微鏡による膜平坦性の評価を行い、化学量論的な組成を持つ平坦な HfO₂ 膜が得られる条件を見出した。MIS キャパシタの容量-電圧特性とゲートリーク特性を測定し、電氣的にも良好なゲート絶縁膜が得られている事を確認した。これにより、ALD 法により堆積したゲート絶縁膜を有する Ge 高信頼性トランジスタの実現の見通しができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2008 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子電気工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：Ge 基板 MOS トランジスタ 原子層成長 ゲート絶縁膜 信頼性

1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会の進展に伴い現在超高密度集積回路(ULSI)の高機能化・高集積化が益々求められており、MOS トランジスタの更なる高性能化と高信頼性が不可欠である。従来トランジスタの高性能化は Si 構造の微細化により実現されてきたが、最近 Ge 基板や SiGe 基板を用いたトランジスタに代表される様に、異種材料の導入による検討も真剣になされ始めた。バルク Ge は、室温での電子移動度が Si の 2.6 倍、ホール移動度が Si の 4.2 倍大きく、高速動作が期待できる。しかし Ge 基板上への信頼性の高いゲート絶縁膜の形成については、界面での多量の欠陥の存在等の多くの問題があり、研究開始当初においては国内外で報告され始めたばかりであった(例えば Wu et al., "Effect of surface NH₃ anneal on the physical and electrical properties of HfO₂ films on Ge substrate," Applied Physics Letters Vol. 84, pp. 3741-3743 (2004))。また、その他の GeMOS トランジスタ作製のための要素技術についても、まだ十分には確立されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、将来の高性能デバイスとして期待される Ge 基板を用いた MOS トランジスタの作製方法を確立する事である。特に、Ge 基板上への高信頼性ゲート絶縁膜を作製する技術の開発とその電気特性・信頼性の評価及びソース/ドレイン上に Ge 金属化合物を形成し金属電極とのコンタクト抵抗を低減する技術等の要素技術の確立を通して、高性能・高信頼性 GeMOS トランジスタを実現する事である。

3. 研究の方法

tetrakis diethylmethylamino hafnium (TDEAH)と水蒸気の交互照射を用いて Ge 基板上への HfO₂ についての原子層堆積(ALD)法の開発を行った。また、SiCl₄と NH₃による ALDを用いた Ge 上への Si 窒化膜の堆積も行った。

4. 研究成果

図 1 は、HF ラストの Ge 基板に HfO₂を ALD 法により 20 サイクル堆積する前後での原子間力顕微鏡による表面モルフォロジーである。表面粗さの rms は堆積前が 0.27nm で堆積後が 0.30nm であり、表面粗さは堆積の前後でほとんど変化しない事が判る。

ラザフォード後方散乱 (RBS)法により、Ge 基板上に ALD 法で 20 サイクル堆積した HfO₂膜の化学組成を調べた。図 2 は、RBS 法により得られた HfO₂堆積膜に対する Hf, Ge, O 濃度

の深さ方向依存性である。図より HfO₂膜の表面から HfO₂層と GeO_x界面層の境界までの厚さは 1.98nm であり、GeO_x界面層の厚さは 0.26nm である事が判る。また、表面から 0.75nm から 1.5nm の厚さの HfO₂層の Hf と O の原子数の割合は約 1 : 2 であり化学量論的である事が判る。しかし、HfO₂層の表面に近い領域は比較的多くの Ge 原子を含んでおり、また、GeO_x界面層にも比較的多くの Hf 原子を含んでいる事が判る。これは ALD による HfO₂の堆積中に Ge と Hf の拡散が生じている事を示唆していると考えられる。また、HfO₂層の表面から 0.75nm までの深さの領域では、拡散した Ge が酸化されていると考えられる。図 2 において、この領域で O 原子が過剰に存在している理由はこのためであると考えられる。これに対して、Si 基板上への ALD による HfO₂膜においては堆積膜全体について化学量論的であり、膜表面付近においても過剰な O は観測されない。

図 3 に ALD 法で HfO₂を形成した場合の膜厚の ALD サイクル数依存性を示した。膜厚はサイクル数に比例している事が判り、その傾きから堆積レートは 0.09nm と見積もれる。図 3 における Y 軸切片から GeO_x界面層の膜厚は 0.2nm と見積もられ、図 2 における RBS の結果とほぼ一致した。この堆積の特性は、Si 基板上の ALD 法による堆積の場合と類似している。この事により、Ge 基板上の ALD 法による HfO₂の堆積は Si 基板上の場合と同様に、レイヤーバイレイヤーの自己停止機構を有していると考えられる。

図 3 には、基板温度 400℃において ALD 法で Si 窒化膜を Ge 基板上に堆積した場合の膜厚の ALD サイクル数依存性も示した。膜厚はサイクル数に比例している事が判り、その傾きから堆積レートは 0.055nm と見積もれる。図 3 における Y 軸切片から GeO_x界面層の膜厚は 1.0nm と見積もられる。

図 4 (a)は Al/HfO₂/p-Ge MIS キャパシタの 300、500、1000KHz における容量-電圧(C-V)特性である。HfO₂は 40 サイクル ALD により堆積しており、エリプソンにより測定した物理膜厚は 3.8nm である。C-V 特性は比較的大きいヒステリシスと周波数依存性を示している。300KHz における負電圧側から正電圧側への掃引の場合と正電圧側から負電圧側への掃引の場合のフラットバンド電圧(V_{fb})シフトは、0.15V である。測定周波数の増加に伴って、V_{fb}は負電圧方向にシフトし、蓄積容量は多少低下する。これに比べて、Si 基板上の ALD HfO₂ ゲート絶縁膜は C-V 特性においてヒステリシスも周波数依存性も示さない。Ge 基板

における MIS キャパシタの C-V 特性は、Ge 基板上の HfO_2 は膜の品質が Si 基板上の HfO_2 膜に比べて劣っているためと考えられる。これは Ge 基板上へ堆積した HfO_2 が Ge の拡散による可動イオンと不安定な自然酸化膜による界面準位を含むためであると考えられる。300kHz における蓄積容量から得られた酸化膜換算膜厚 (EOT) は 2.4nm である。

図 4 (b) は Al/Si 窒化膜/p-Ge MIS キャパシタの 200、300、500kHz における C-V 特性である。Si 窒化膜は基板温度 350°C での 70 サイクル ALD により堆積しており、エリプソにより測定した物理膜厚は 3.9nm である。C-V 特性は HfO_2 膜 MIS キャパシタに比べて大きな周波数依存性を示している。300kHz における蓄積容量から得られた EOT は 3.0nm である。同程度の物理膜厚を持つにもかかわらず HfO_2 膜に比べて Si 窒化膜が小さい EOT を持つ事は、 HfO_2 膜が Si 窒化膜に比べてより大きな誘電率を持つ事と矛盾しない。しかし、導出した Ge 基板上の HfO_2 膜の比誘電率の値は約 7 であり、Si 基板上の HfO_2 膜の比誘電率の値 12~14 に比べて小さい。

図 5 に上記 Ge 基板上の HfO_2 膜及び Si 窒化膜 MIS キャパシタのゲートリーク電流を示す。Ge の小さいバンドギャップと Ge 上へ堆積した高誘電率膜の低品質性によりゲートリーク電流は両方の極性において Si 基板上の場合よりも大きくなっている。しかしながら、等価な EOT にスケールした場合の報告されている Ge 基板上へ堆積した高誘電率膜のゲートリーク電流とを比べると図 5 に示した Al/ HfO_2 /p-Ge MIS キャパシタのゲートリーク電流は等しいレベルである。一方、Ge 上に堆積した Si 窒化膜は良好でない電流リーク特性を示した。従って、Ge 上に SiCl_4 と NH_3 による ALD を用いて堆積した Si 窒化膜は更なる最適化が必要と考えられる。

以上まとめると、 $\text{Hf}[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_4$ と H_2O の交互照射を用いた Ge 基板上への HfO_2 の ALD 法の確立を行い、RBS による組成分析、原子間力顕微鏡による膜平坦性の評価を行い、良好な膜が得られている事を確認した。また、電気特性についても MIS キャパシタを C-V 特性から EOT の決定を行うとともにリーク電流評価を行い、良好な膜が得られている事を確認した。更に Ge 基板上への Si 窒化膜の ALD についても調べ、MIS キャパシタの C-V 特性から EOT の決定しリーク電流評価を行ったが、良好な膜を得る事はできなかった。

一方、ソース/ドレイン上に Ge 金属化合物を形成し金属電極とのコンタクト抵抗を

低減する技術に関して、Ni と Ge の固相反応の真空アニールにおいて、250°C で NiGe の多結晶化が始まり、350°C でほとんどが結晶化しシート抵抗も低下し、400°C 以上では表面の平坦性が悪化する事を再確認した。

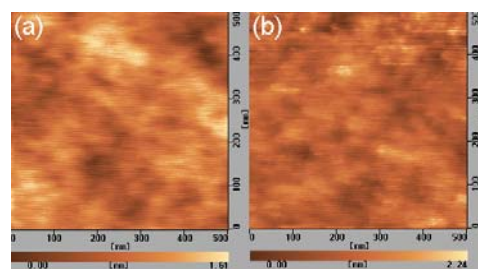


図 1 Ge 基板上の原子間力顕微鏡像による表面粗さの観察。HF ディップ前(a)と後(b)。

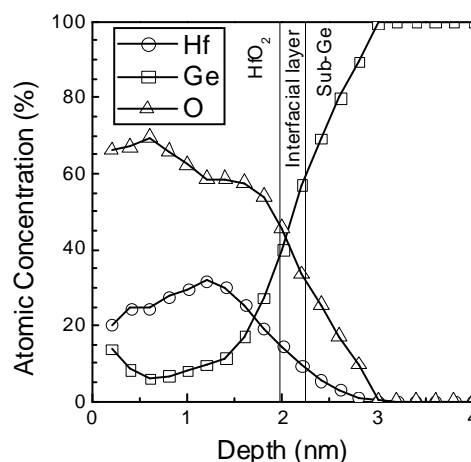


図 2 Ge 基板上に 300°C で 20 サイクル ALD 法により堆積した HfO_2 膜についての高分解能 RBS による Hf、Ge、O の深さ方向プロファイル。

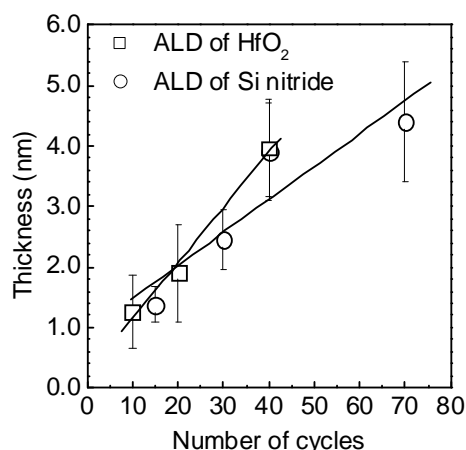


図 3 Ge 基板上の ALD 法で堆積した HfO_2 膜と Si 窒化膜の膜厚のサイクル数依存性。

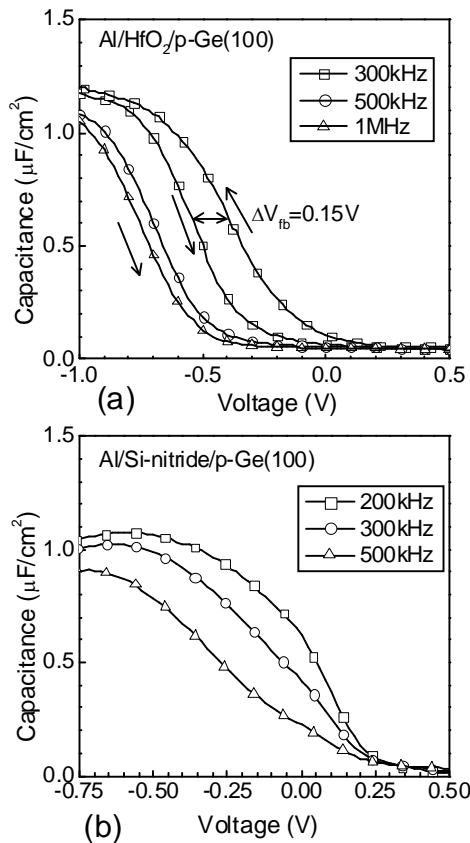


図4 容量-電圧特性。(a) Al/HfO₂/p-Ge MIS キャパシタ、(b) Al/Si 窒化膜/p-Ge MIS キャパシタ。

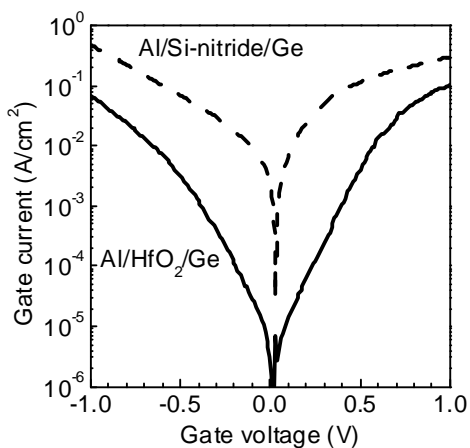


図5 Al/HfO₂/p-Ge MIS キャパシタと Al/Si 窒化膜/p-Ge MIS キャパシタのゲートリーク電流特性。

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 1 件)

1. Shiyang Zhu and Anri Nakajima, "Atomic Layer Deposition of HfO₂ and Si Nitride on Ge Substrates," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, No. 12, pp. 7699–7701, Dec. (2007).

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 安理 (NAKAJIMA ANRI)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研究所・准教授

研究者番号：70304459

(2) 研究分担者

横山 新 (YOKOYAMA SHIN)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研究所・准教授

研究者番号：80144880

(3) 連携研究者