

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360014

研究課題名 超高感度・高分解能界面分析によるゲート絶縁膜／シリコン界面構造の決定

研究課題名 Determination of Insulator/Si Interface Structure by Extremely Sensitive and Highly Resolved Interfacial Analyses

研究代表者

服部 健雄(HATTORI TAKEO)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授

研究者番号：10061516

研究成果の概要（和文）：酸素ラジカルおよび窒素-水素ラジカルを用いて形成した高品質のシリコン酸化膜およびシリコン窒化膜の組成および構造の解明を目指して、角度分解 Si 2p、O 1s、N 1s 内殻準位および価電子帯スペクトルを検出深さを揃えて測定した。その解析より、シリコン酸化膜およびシリコン窒化膜の密度と構造、界面組成遷移層における組成および構造の面方位依存性、界面における価電子帯上端の不連続量（バンドオフセット）の面方位依存性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Composition and chemical structures of high quality Si-SiO₂ systems formed using oxygen radicals and those of high quality Si-Si₃N₄ systems formed using nitrogen-hydrogen radicals were studied by measuring angle-resolved photoelectron spectra arising from Si 2p and O 1s core levels and valence band with the same probing depth.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性

キーワード：界面

1. 研究開始当初の背景

(1) 酸素ラジカルにより形成された SiO₂/Si 界面構造および窒素-水素ラジカルにより形成された Si₃N₄/Si 界面構造の組成や化学結合状態およびこれらの面方位依存性は明らかではなかった。

(2) 当該 SiO₂/Si 界面および当該 Si₃N₄/Si 界面における価電子帯上端の不連続量の面方位依存性は明らかではなかった。

2. 研究の目的

(1) 酸素ラジカルにより形成された SiO₂/Si 界面構造および窒素-水素ラジカルにより

形成された $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面構造の組成や化学結合状態およびこれらの面方位依存性を解明する。

(2) 当該 SiO_2/Si 界面および当該 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面における価電子帯上端の不連続量の面方位依存性を解明する。

3. 研究の方法

(1) 東北大学大見忠弘グループが開発したマイクロ波励起プラズマにより生成される酸素ラジカルや窒素 - 水素ラジカルを用いて、デバイスに適用可能な信頼性の高いシリコン酸化膜やシリコン窒化膜を、シリコン酸化膜については 400°C で、シリコン窒化膜については 600°C で、大見グループが開発した超平坦化したシリコン基板上に作成した。

(2) 光電子の脱出角(TOA)を変化させて光電子分光を行う、いわゆる角度分解光電子分光法を用いることにより、非破壊で組成および化学結合状態の深さ方向変化を明らかにする。界面組成遷移層における組成の深さ方向分解能を高めるために、シリコン酸化膜およびシリコン窒化膜の厚みを約 1 nm とし、非弾性散乱平均自由行程を 2 nm となるように、西播磨にある SPring-8 において、フォトン・エネルギーを調節した。

(3) 界面遷移層における化学結合状態とその量を詳細に調べるために、光電子の運動エネルギーの分解能を 100 meV にするとともに、高精度で組成を解明するために、シリコン酸化膜の場合には、 $\text{Si } 2p$ 、 $\text{O } 1s$ 内殻準位、シリコン窒化膜の場合には、 $\text{Si } 2p$ 、 $\text{O } 1s$ 、 $\text{N } 1s$ 内殻準位からの光電子の運動エネルギーを揃えることにより、 Si 原子、 O 原子、 N 原子の検出深さを揃えた。

(4) シリコン酸化膜については、 $\text{Si}(100)$ 、 $\text{Si}(111)$ 、 $\text{Si}(110)$ および $\text{Si}(551)$ 上に、シリコン窒化膜については、 $\text{Si}(100)$ 、 $\text{Si}(111)$ 、 $\text{Si}(110)$ 上に形成することにより、界面組成遷移層の組成の面方位依存性を解明する。なお、 $\text{Si}(551)$ についても検討したのは、 $\text{Si}(551)$ が $\text{Si}(110)$ に近いデバイス特性を示すので、 $\text{Si}(110)$ よりも平坦化しやすい $\text{Si}(551)$ の方が金属酸化物半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)の作成に適していることによる。

(5) これまでは、膜厚 0.7 nm 以下のシリコン酸化膜で覆われた SiO_2/Si 界面および膜厚 0.7 nm 以下のシリコン窒化膜で覆われた $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面について研究が行われてきた。しかし、MOSFET を動作させるには、 SiO_2/Si 界面組成遷移層(厚み約 0.53 nm) を少なくとも 1 分子層のシリコン酸化膜(厚み約

0.35 nm) で被覆するか、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面組成遷移層を少なくとも 1 分子層のシリコン窒化膜で被覆して安定化する必要がある。本研究では、約 2 分子層のシリコン酸化膜で安定化した SiO_2/Si 界面および約 $2-3$ 分子層以上のシリコン窒化膜で安定化した $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面を研究対象とした。

(6) 約 2 分子層のシリコン酸化膜や窒化膜で被覆された界面組成遷移層からの光電子スペクトルを抽出するには、界面組成遷移層における光電子の非弾性散乱による減衰を考慮したスペクトル解析法が必要となる。本研究では、界面からの光電子も検出できる $\text{TOA} = 80-85^\circ$ での $\text{Si } 2p_{3/2}$ 光電子スペクトルと表面近傍からの光電子を主として検出できる $\text{TOA} = 15^\circ$ での $\text{Si } 2p_{3/2}$ 光電子スペクトルとの差をとることにより、界面を被覆する絶縁膜からのスペクトルの影響を差し引いた界面に由来する $\text{Si } 2p_{3/2}$ スペクトルおよび Si 基板からのスペクトルの影響を差し引いた界面に由来する $\text{Si } 2p_{3/2}$ スペクトルを抽出し、界面に局在する化学結合状態に由来するスペクトルを感度よく抽出する方法を開発した。

(7) シリコン酸化膜については、 $\text{O } 1s$ スペクトル強度の TOA 依存性の詳細な解析により、界面に局在する O 原子と膜中に局在する O 原子とを分離検出した。また、シリコン窒化膜については、 $\text{N } 1s$ スペクトル強度の TOA 依存性の詳細な解析により、 Si_3N_4 膜の表面に形成される $\text{Si}(\text{OH})_3\text{N}$ 膜と Si_3N_4 膜とを結合している N 原子と Si_3N_4 膜を構成している N 原子とを分離検出した。

4. 研究成果

(1) SiO_2/Si 界面組成遷移層 :

$\text{Si } 2p_{3/2}$ スペクトルは、次の Si に由来するスペクトルに分解される : Si-S-O (Si^*)、 bulk Si (Si^0)、 $\text{Si}_3\text{-Si-H}$ (mh)、 $\text{Si}_2\text{-Si-H}_2$ (dh)、 $\text{Si}_3\text{-Si-O}$ (Si^{1+})、 $\text{Si}_2\text{-Si-O}_2$ (Si^{2+})、 Si-Si-O_3 (Si^{3+})、 Si-O_4 (Si^{4+})。ここに、 Si^* は第二近接の酸素原子の影響を受ける Si 原子を表わす ; monohydride を表わす mh と dihydride を表わす dh の結合エネルギー(BE)が $\text{BE}(\text{Si}^0)$ と $\text{BE}(\text{Si}^{1+})$ の中間にある ; 3 個の Si 原子と 1 個の O 原子と結合した Si 原子を表わす Si^{1+} 、 2 個の Si 原子と 2 個の O 原子と結合した Si 原子を表わす Si^{2+} 、 1 個の Si 原子と 3 個の O 原子と結合した Si 原子を表わす Si^{3+} は、 Si^0 と Si^{4+} との中間の酸化状態(IMS)にあり、 $\text{BE}(\text{Si}^0)$ と $\text{BE}(\text{Si}^{4+})$ との中間の BE を有する。 $\text{BE}(\text{Si}^0)$ からの化学シフト(CS)は、 $-0.2(\text{Si}^*)$ 、 $0.30(\text{mh})$ 、 $0.50(\text{dh})$ 、 $0.94(\text{Si}^{1+})$ 、 $1.86(\text{Si}^{2+})$ 、 $2.65(\text{Si}^{3+})\text{ eV}$ であった。 $\text{BE}(\text{Si}^0)$ と $\text{BE}(\text{Si}^{4+})$ との中間の BE を有する状態 (IMS) の面密度を意味する D(I) の TOA 依存性の解析から、 $\text{Si}(100)$ 、 $\text{Si}(111)$ 、 $\text{Si}(110)$ 、 $\text{Si}(551)$ 上

に形成されたD(I)は、それぞれのSi基板上でのSiの単原子層換算で、それぞれ1.53、1.22、0.91、1.03となった。いずれの結晶面上において形成された組成遷移層中にも Si^{3+} が存在する。

(2) シリコン酸化膜の化学量論的組成：

図1に示すように、界面に局在するO原子からのO 1sスペクトルの強度とバルク SiO_2 を構成するO原子からのO 1sスペクトルの強度との比のTOA依存性から、界面に局在するO原子がランダムに配向していることが明らかになった。さらに、Si-O結合に由来するSi $2p_{3/2}$ 光電子スペクトル強度を示す $I(\text{Si } 2p_{3/2}, \text{Si-O})$ とO 1sスペクトル強度を示す $I(\text{O } 1s)$ との比のTOA依存性から、シリコン酸化膜中にO-O結合が仮に含まれているとしてもSi-O結合数の0.5%以下であることが明らかになった。ここに、 $I(\text{Si}^{1+})$ 、 $I(\text{Si}^{2+})$ 、 $I(\text{Si}^{3+})$ 、 $I(\text{Si}^{4+})$ を Si^{1+} 、 Si^{2+} 、 Si^{3+} 、 Si^{4+} に由来するSi $2p_{3/2}$ スペクトルの強度として、 $I(\text{Si } 2p_{3/2}, \text{Si-O})$ が $[0.25 I(\text{Si}^{1+}) + 0.5 I(\text{Si}^{2+}) + 0.75 I(\text{Si}^{3+}) + I(\text{Si}^{4+})]$ に比例することを用いた。

(3) SiO_2/Si 界面におけるバンドオフセット：
 $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Si}(110)$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Si}(551)$ 界面における価電子帯上端の不連続量、いわゆるバンドオフセット量は、いずれも 4.45 ± 0.14 eVに等しく、 $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ 界面におけるバンドオフセット量よりも 0.07 eVだけ小さい。

(4) シリコン窒化膜の構造：

Si_3N_4 膜の表面に形成される $\text{Si}(\text{OH})_3\text{N}$ 膜と Si_3N_4 膜とを結合しているN原子に由来するN 1sスペクトルが Si_3N_4 膜を構成するN原子に由来するN 1sスペクトルより高エネルギー側に現れる。前者のスペクトル強度を $I(\text{N } 1s, \text{HBE})$ 、後者のスペクトル強度を $I(\text{N } 1s, \text{LBE})$ として得られる $I(\text{N } 1s, \text{HBE})/I(\text{N } 1s, \text{LBE})$ のTOA依存性およびN 1s光電子スペクトル強度を $I(\text{N } 1s)$ 、O 1s光電子スペクトル

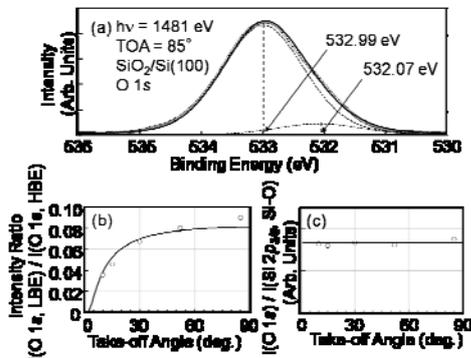


図1 (a) Si(100)上に形成したシリコン酸化膜からのO 1s光電子スペクトル。(b) $I(\text{O } 1s, \text{LBE})/I(\text{O } 1s, \text{HBE})$ のTOA依存性。(c) $I(\text{O } 1s)/I(\text{Si } 2p_{3/2}, \text{Si-O})$ のTOA依存性

強度を $I(\text{O } 1s)$ として得られる $I(\text{O } 1s)/I(\text{N } 1s)$ のTOA依存性から、図2に示す構造が導かれた。

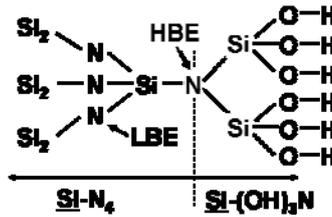


図2 $\text{Si}(\text{OH})_3\text{N}/\text{Si-N}_4$ 界面近傍における構造

(5) 界面層からのSi $2p_{3/2}$ スペクトルの抽出：
 研究方法(6)に述べた図3に示す方法を用いると、Si $2p_{3/2}$ スペクトルは、次のSiに由来するスペクトルに分解される： Si-S-N (Si^*)、bulk Si (Si^0)、 $\text{Si}_3\text{-Si-H}$ (mh)、 $\text{Si}_3\text{-Si-N}$ ($\text{Si}^{1+}(\text{N})$)、 $\text{Si}_2\text{-Si-NH}$ 、 $\text{Si}_2\text{-Si-N}_2$ ($\text{Si}^{2+}(\text{N})$)、 Si-N_4 ($\text{Si}^{4+}(\text{N})$)。ここに、 Si^* は第二近接の窒素原子の影響を受けるSi原子を表わす； $\text{Si}^{1+}(\text{N})$ は3個のSi原子と1個のN原子と結合したSi原子を、 $\text{Si-Si}_2\text{NH}$ は2個のSi原子、1個のN原子、1個のH原子と結合したSi原子を、 $\text{Si}^{2+}(\text{N})$ は2個のSi原子と2個のN原子と結合したSi原子を表わす。BE(Si^0)からの化学シフト(CS)は、 $-0.2(\text{Si}^*)$ 、 $0.30(\text{mh})$ 、 $0.61(\text{Si}^{1+}(\text{N}))$ 、 $0.89(\text{Si}_2\text{-Si-NH})$ 、 $1.23(\text{Si}^{2+}(\text{N}))$ eVであった。注目されるのは、1個のSi原子と3個のN原子と結合したSi原子を表わす $\text{Si}^{3+}(\text{N})$ が、面方位にかかわらず組成遷移層中に存在していない点である。

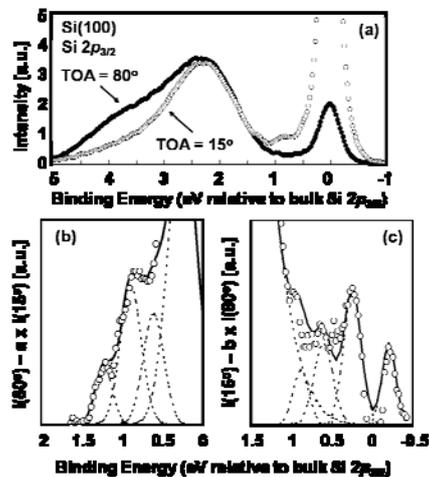


図3 (a) 15°と80°のTOAで測定したSi(100)上に形成した $\text{Si-Si}_3\text{N}_4$ 系に由来するSi $2p_{3/2}$ スペクトル。(b) Si_3N_4 膜および Si_3N_4 膜を被覆している酸化膜からのスペクトルを除去するように(a)中の二つのスペクトルの差をとることにより得られたスペクトル。(c) シリコン基板からのスペクトルを除去するように(a)中の二つのスペクトルの差をとることにより得られたスペクトル。

(6) 1原子層の Si_3N_4 膜の面密度：

Si(111)上に形成した Si-(OH)₃N 膜と Si₃N₄ 膜とを結合している N 原子の面密度が Si(100)と Si(110)上に形成した Si-(OH)₃N 膜と Si₃N₄ 膜とを結合している N 原子の面密度よりも 15% 小さくなることから、Si(111)上に形成した Si₃N₄ からなる 1 層の面密度は Si(110)上に形成した Si₃N₄ からなる 1 層の面密度が 15% 小さいと仮定すると、IMS にある Si の面密度は、Si の単原子層換算で、それぞれ 1.12、0.99、0.99 となり、面方位に係わらず急峻な界面組成遷移層が形成されていることが明らかとなった。この急峻な組成遷移は、界面組成遷移層に Si³⁺(N) が存在していないことと密接な関係があると推測される。

(7) Si₃N₄/Si 界面でのバンドオフセット :

Si(100)、Si(111)、Si(110)上に形成された Si₃N₄/Si 界面における価電子帯上端の不連続量、いわゆるバンドオフセット量は、それぞれ 1.63±0.05、1.63±0.05、1.62±0.06 eV と、お互いに等しくなる。これは、界面組成遷移層に Si³⁺が存在していないことと密接な関係があると推測される。

(8) 界面歪 :

Si(100)、Si(111)、Si(110)基板に由来する Si 2p_{3/2} スペクトルの半値幅(FWHM)は、それぞれ 0.409、0.395、0.392 eV である。これらは、(6)に述べた Si(100)、Si(111)、Si(110)基板上に形成される Si 単原子層換算の IMS のそれぞれの厚みが 1.12、0.99、0.99 となることと密接な関係があると推測される。すなわち、Si 基板に由来する Si 2p_{3/2} スペクトルの FWHM および Si 単原子層換算の IMS の厚みが、Si 単原子層の面密度が 6.8×10¹⁸、7.85×10¹⁸、9.6×10¹⁸ m⁻² と増加するとともに減少するのは、Si の単原子層の面密度が増加して 1 分子層の Si₃N₄ 膜の面密度 (1.17×10¹⁹ m⁻²) に近づくとともに界面歪が減少することによると理解される。この界面歪の面方位依存性は、明治大学小椋厚志研究室において Ar⁺レーザー(364 nm)励起ラマン分光により検出された界面歪の面方位依存性(雑誌論文⑭、学会発表⑥)および京都大学木村健二研究室所属の藤田頌氏が高分解能ラザフォード後方散乱により検出した界面歪の面方位依存性(平成 21 年度卒業研究)と一致する。

(9) まとめ

Si、O、N の検出深さを等しくして、角度分解光電子分光を行うことにより、非破壊で、シリコン酸化膜およびシリコン窒化膜の組成と構造、SiO₂/Si 界面および Si₃N₄/Si 界面における組成遷移層の組成と構造、当該界面における価電子帯のバンドオフセットを調べた。その結果、次の 3 点が明らかになった。

1) 結晶面方位に無関係に、SiO₂/Si 界面組成

遷移層中には Si³⁺が存在するのに対して、Si₃N₄/Si 界面組成遷移層中には Si³⁺(N)が存在しない。これは、次の結果と密接な関係がある；価電子帯上端の不連続量は、SiO₂/Si 界面では面方位に依存し、Si₃N₄/Si 界面では面方位に依存しない。2) シリコン酸化膜中に O-O 結合が仮に含まれているとしても Si-O 結合数の 0.5%以下である。3) 窒化後にも窒化されない最表面の 1 原子層の Si 膜は、窒化後にチャンバーから取り出すと、酸化される。こうして形成される 1 分子層のシリコン酸化膜と窒化膜を結ぶ 1 原子層の N 層が検出された。ところで、シリコン基板側からの SiO₂/Si 界面組成遷移層の検出については、すでに予備実験は終了し、現在、詳細な検討を行っている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① T. Suwa, A. Teramoto, Y. Kumagai, K. Abe, X. Li, Y. Nakao, M. Yamamoto, Y. Kato, T. Muro, T. Kinoshita, T. Ohmi, and T. Hattori, Crystallographic orientation dependence of compositional transition and valence band offset at SiO₂/Si interface formed using oxygen radicals, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 96, No. 10, 2010, 104908-1~3, 2010.
- ② 服部健雄、廣瀬和之、Si-SiO₂系の形成・構造・物性」、表面科学(日本表面科学会)、(社)日本表面科学会創立 30 周年記念特集号分野別記念解説、依頼論文、査読無、Vol. 31, No. 1, 2010, 173103-1~3.
- ③ K. Kakushima, K. Tachi, J. Song, S. Sato, H. Nohira, E. Ikenaga, P. Ahmet, K. Tsutsui, N. Sugii, T. Hattori, and H. Iwai, Comprehensive x-ray photoelectron spectroscopy study on compositional gradient lanthanum silicate film, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 106, No. 12, 2009, 124903-1~6.
- ④ 服部健雄、巻頭言、LSIにかかわる技術の変遷と課題、応用物理学会誌、査読無、Vol. 78, No. 9, 2009 年 9 月, 841.
- ⑤ R. Kuroda, A. Teramoto, Y. Nakao, T. Suwa, M. Konda, R. Hasebe, X. Li, T. Isogai, H. Tanaka, S. Sugawa, and T. Ohmi, Complementary Metal-Oxide-Silicon Field-Effect- Transistors Featuring Atomically Flat Gate Insulator Film/Silicon Interface, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol. 48, 2009, 04C048-1~6.
- ⑥ P. Gaubert, A. Teramoto, W. Cheng, T. Hamada, and T. Ohmi, Different

- mechanism to explain the 1/f noise in n- and p-SOI-MOS transistors fabricated on (110) and (100) silicon-oriented wafers, J. Vac. Sci. Technol. B, 査読有、Vol. 27, No. 1, 2009, 394~401.
- ⑦ R. Kuroda, T. Suwa, A. Teramoto, R. Hasebe, S. Sugawa, and T. Ohmi, Atomically Flat Silicon Surface and Silicon /Insulator Interface Formation Technologies for (100) Surface Orientation Large-Diameter Wafers Introducing High Performance and Low-Noise Metal-Insulator-Silicon FETs, IEEE Trans. Electron Devices, 査読有、Vol. 56, No. 2, 2009, 291~298.
- ⑧ T. Aratani, M. Higuchi, S. Sugawa, E. Ikenaga, J. Ushio, H. Nohira, T. Suwa, A. Teramoto, T. Ohmi, and T. Hattori, Angle-resolved photoelectron study on the structures of silicon nitride films and Si₃N₄/Si interfaces formed using nitrogen-hydrogen radicals, Journal of Applied Physics, 査読有、Vol. 104, No. 11, 2008, 114112-1~3.
- ⑨ K. Kakushima, K. Okamoto, K. Tachi, J. Song, T. Kawanago, K. Tsutsui, N. Sugii, P. Ahmet, T. Hattori, and H. Iwai, Observation of band bending of metal/high-k Si capacitor with high energy x-ray photoelectron spectroscopy and its application to interface dipole measurement, Journal of Applied Physics, 査読有、Vol. 104, No. 10, 2008, 104908-1~3.
- ⑩ K. Tsutsui, T. Matsuda, M. Watanabe, C-G Jin, Y. Sasaki, B. Mizuno, E. Ikenaga, K. Kakushima, P. Alhmet, T. Maruizumi, H. Nohira, T. Hattori, and H. Iwai, Activated boron and its concentration profiles in heavily doped Si studied by soft x-ray photoelectron spectroscopy and Hall measurements, Journal of Applied Physics, 査読有、Vol. 104, No. 9, 2008, 093799-1~3.
- ⑪ M. Murugesan, J. C. Bea, C. -K. Yin, H. Nohira, E. Ikenaga, T. Hattori, M. Nishijima, T. Fukushima, T. Tanaka, M. Miyao, and M. Koyanagi, Investigation of the effect of *in situ* annealing of FePt nanodots under high vacuum on the chemical states of Fe and Pt by x-ray photoelectron spectroscopy, Journal of Applied Physics, 査読有、Vol. 104, No. 7, 2008, 074316-1~5.
- ⑫ A. Ogura, T. Yoshida, D. Kosemura, Y. Kakemura, T. Aratani, M. Higuchi, S. Sugawa, A. Teramoto, T. Ohmi, and T. Hattori, Evaluation of Si₃N₄/Si Interface by UV Raman Spectroscopy, Applied Surface Science, 査読有、Vol. 254, 2008, 6229~6231.
- ⑬ K. Kakushima, K. Okamoto, M. Adachi, K. Tachi, J. Song, S. Sato, T. Kawanago, P. Ahmet, K. Tsutsui, N. Sugii, T. Hattori, and H. Iwai, Band bending measurement of HfO₂/SiO₂/Si capacitor with ultra-thin La₂O₃ insertion by XPS, Applied Surface Science, 査読有、Vol. 254, 2008, 6106~6108.
- ⑭ 寺本章伸, 荒谷崇, 樋口正顕, 池永英司, 平山昌樹, 須川成利, 服部健雄, 大見忠弘, マイクロ波励起プラズマを用いた高品質シリコン窒化膜の形成, 真空 (日本真空協会), 依頼論文, 査読有、Vol. 50, No. 11, 2007年11月, 659~664.
- ⑮ 河瀬和雅, 梅田浩司, 井上真雄, 諏訪智之, 寺本章伸, 服部健雄, 大見忠弘, ラジカル窒化シリコン酸窒化膜における窒素プロファイルのX線光電子分光分析による評価, 真空 (日本真空協会), 依頼論文, 査読有、Vol. 50, No. 11, 2007年11月, 672~677.
- ⑯ M. Higuchi, S. Sugawa, E. Ikenaga, J. Ushio, H. Nohira, T. Maruizumi, A. Teramoto, T. Ohmi, and T. Hattori, Subnitride and valence band offset at Si₃N₄/Si interface formed using nitrogen-hydrogen radicals, Applied Physics Letters, 査読有、Vol. 90, No. 12, 2007, 123114-1~3.
- ⑰ M. Higuchi, T. Aratani, T. Hamada, S. Shinagawa, H. Nohira, E. Ikenaga, A. Teramoto, T. Hattori, S. Sugawa, and T. Ohmi, Electrical Characteristics of Si₃N₄ Films Formed by Directly Radical Nitridation on Si(110) and Si(100) Surfaces, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有、Vol. 46, No. 4B, 2007, 1895~1898.
- ⑱ **Introductory Invited Paper:** T. Hattori, H. Nohira, S. Shinagawa, M. Hori, M. Kase, and T. Maruizumi, Angle-resolved photoelectron spectroscopy on gate insulators, Microelectronics Reliability, 査読有、Vol. 47, 2007, 20~26.
- ⑲ **Review:** K. Hirose, H. Nohira, K. Azuma, and T. Hattori, Photoelectron Spectroscopy Studies of SiO₂/Si Interfaces, Progress in Surface

- Science、査読有、Vol. 82, 2007、3~54.
- ⑳ A. Teramoto, T. Hamada, M. Yamamoto, P. Gaubert, H. Akahori, K. Nii, M. Hirayama, K. Arima, K. Endo, S. Sugawa, and T. Ohmi, Very High Carrier Mobility for High-Performance CMOS on a Si(110) Surface, IEEE Trans. Electron Devices、査読有、Vol. 54、No. 6、2007、1438~1445.

[学会発表] (計6件)

- ① 服部真季、小瀬村大亮、武井宗久、永田晃基、赤松弘彬、小椋厚志、諏訪智之、寺本章伸、服部健雄、大見忠弘、小金澤智之、廣沢一郎、原子スケールで平坦なSiO₂/Si界面極近傍における歪評価、応用物理学会、東海大学、19p-P13-13、2010年3月19日.
- ② T. Suwa, T. Aratani, M. Higuchi, S. Sugawa, E. Ikenaga, J. Ushio, H. Nohira, A. Teramoto, T. Ohmi and T. Hattori, Study on Compositional Transition Layers at Gate Dielectrics/Si Interface by using Angle-resolved X-ray Photoelectron、Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2009)、Busan, Korea, June 25, 2009、
- ③ M. Hattori, T. Yoshida, D. Kosemura, A. Ogura, T. Suwa, A. Teramoto, T. Hattori, and T. Ohmi, UV-Raman Spectroscopy Study on SiO₂/Si Interface, Symposium on Dielectric and Semiconductor Materials, Devices, and Processing, 215th ECS Meeting, May 25, 2009, San Francisco, CA, 780 ; ECS Transactions, Vol.19, No. 2, 2009, 55-66.
- ④ *Invited*: S. Zaima and T. Hattori, Study on Gate Stacks in Future Nano-Scaled CMOS using Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy, International Workshop for New Opportunities in Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy: HAXPES 2009, Long Island, NY, USA, May 20 - May 22, 2009.
- ⑤ 服部真季、吉田哲也、小瀬村大亮、小椋厚志、諏訪智之、寺本章伸、服部健雄、大見忠弘、UVラマン分光法によるSiO₂/Si界面の評価、応用物理学会、筑波大学、30p-S-14、2009年3月30日.
- ⑥ T. Yoshida, K. Yamasaki, D. Kosemura, Y. Kakemura, T. Aratani, M. Higuchi, S. Sugawa, A. Teramoto, T. Ohmi, and T. Hattori, "Evaluation of Si₃N₄/Si Interface by UV Raman Spectroscopy, Fifth International symposium on Control of Semiconductor Interfaces, OA2-5, Nov. 13, 2007 Hachioji, Tokyo.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

服部 健雄 (HATTORI TAKEO)
東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授
研究者番号：10061516

(2)研究分担者

木村 健二 (KIMURA KENJI)
京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号：50127073

中嶋 薫 (NAKAJIMA KAORU)
京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号：80293885

野平 博司 (NOHIRA HIROSHI)
東京都市大学・工学部・准教授
研究者番号：30241110

寺本 章伸 (TERAMOTO AKINOBU)
東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授
研究者番号：80359554

諏訪 智之 (SUWA TOMOYUKI)
東北大学・未来科学技術共同研究センター・助教
研究者番号：50127073

木下 豊彦 (KINOSHITA TOYOHICO)
(財)高輝度光科学研究センター・分子物性IIグループ・主席研究員
研究者番号：60202040