

平成21年5月14日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007 ~ 2008
 課題番号：19360015
 研究課題名 (和文) 次世代 CMOS プロセスを基礎付ける Si (110) 表面酸化機構の解明と電気特性
 研究課題名 (英文) Oxidation kinetics of Si (110) surface and electrical properties of the oxide as a basis for next-generation CMOS devices
 研究代表者
 末光 眞希 (SUEMITSU MAKI)
 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号：00134057

研究成果の概要：

CMOS活性面として長く使われてきたSi(100)面の物性的限界に伴い、Si(110)面の使用が注目を集めている。本研究はこのSi(110)面の酸化機構の解明を目的として遂行され、以下を明らかにした。

- (1) Si(110)-16×2清浄表面の初期酸化過程において、16×2再配列構造を構成するペンタゴンペアへの優先酸化を中心とするSi(110)表面に特徴的な酸化機構を見出した。
- (2) Si(110)面初期酸化では、4価の酸化状態が支配的なSi(100)面酸化と大きく異なり、3価の酸化状態が1原子層酸化膜の形成まで一貫して支配的であることを明らかにし、これがSi(110)結晶構造に起因することを示した。
- (3) Si(110)-16×2表面に酸素を室温吸着させ、これを300℃アニールすることによって室温吸着酸化状態が熱酸化膜に近い酸化構造へと移動することを見出し、Si(100)や(111)面で確認されていた準安定酸化吸着状態がSi(110)にも存在する事を初めて明らかにした。
- (4) 光電子分光と表面歪測定を比較測定し、酸化の進行に伴い、結晶構造を反映した異方性を伴う表面歪が発生することを初めて明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

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：Si(110), 初期酸化, リアルタイム光電子分光測定, 「その場」走査トンネル顕微鏡測定

1. 研究開始当初の背景

これまで Si(100)面上に構築されてきた CMOS

テクノロジーは今や物性的限界に直面しており、Si(110)面が新たな注目を集めていた。Si(110)面

は Si(100)面に比べ正孔移動度が約 2 倍高く、また高度集積化と低消費電力化が達成可能なマルチゲートトランジスタの主要な活性面となるからである。このように重要性の高まる Si(110)面だが、

(1) Si(110)-CMOS プロセスの基本となる酸化ダイナミクスの理解は、これまできわめて不十分であった。酸化レートの方方位比較研究の一環として一部報告があったものの、今後必要とされる 2nm 以下の極薄酸化領域の酸化機構を Si(110)面について詳細に研究した例は存在しなかった。

(2) 近年、トンネルリーク電流低減対策として high-k 絶縁膜が注目を集めているが、この場合でも、界面準位低減のために極薄 Si 酸化膜の挿入が不可欠であり、極薄酸化機構の理解の必要性は高まる一方である。

以上のような背景から、Si(110)面の極薄酸化領域に関する知見を得ることは非常に重要であるとの認識に達し、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究は次世代 CMOS テクノロジーで重要な役割を果たす Si(110)面に関し、基板洗浄から極薄酸化膜形成に至る一連の表面科学を解明し、Si(110)酸化プロセスの確立に必要な表面素過程を解明すること、 SiO_2/Si 界面および high-k 絶縁膜/ SiO_2/Si 界面の MOS 電気特性と酸化プロセスとの関連を明らかにし、次世代 CMOS プロセス技術を表面科学的に裏付けることを目的として研究を行った。

(1) Si(110)表面作製法の確立

超高真空中熱処理による再配列・清浄表面の作成法を確立する。

(2) Si(110)上酸化機構の解明

①初期酸化時における表面酸化状態の放射光リアルタイム XPS による評価と「その場」STM による原子配列構造の解析

②酸化の時間発展と表面酸化モフォロジーとの関係解明

④酸化に伴う応力発生リアルタイム測定と酸化機構における応力の役割の解明

(3) Si(110)酸化機構と電気特性の関係

酸化構造と界面準位を中心とする電気特性との比較から酸化プロセスの最適化に関する指針を得る。

3. 研究の方法

(1) Si(110)清浄表面の作製と評価

① Si(110)表面の化学洗浄法の確立

真空加熱と RHEED 観察を組み合わせ、Si(110)面に最適の化学洗浄法を開発する。

② 超高真空中熱処理による Si(110)-16×2 再

配列の作製とその原子配列の解明

Si(110)-16×2 構造を安定的に形成する方法論を、通電過熱と STM 測定により明らかにする。

(2) Si(110)上酸化機構の解明

① 初期酸化表面の酸化状態の放射光リアルタイム XPS 測定と酸化機構の解明

極薄酸化膜の評価に適した表面敏感な測定が可能な (財) 高輝度光科学研究センター (SPring-8) の放射光を用い、O 1s と Si 2p 内殻準位スペクトルを用いた Si(110)酸化過程のリアルタイム XPS 測定を行う。

② 初期酸化過程のリアルタイム STM 測定

原子力機構・原科研に設置されている高温 STM により、初期酸化過程のリアルタイム測定を行う。

③ 初期酸化過程のリアルタイム応力測定

Si 酸化は反応界面における過剰 Si 原子の放出を伴い、膜中応力を発生させる。膜中応力は界面反応を律速させるから、酸化に伴う応力発生をリアルタイム測定することは酸化反応を理解する上できわめて重要である。特に Si(110)表面は<001>方向と<-110>方向という強い異方性をもつため、二軸性の応力発生が予想される。本研究では原研・東海村所有のマルチ光学ビーム・リアルタイム表面歪解析装置を用い、Si(110)表面初期酸化過程における歪発生をリアルタイム測定する。

4. 研究成果

研究目的に記した各項目に対し、以下の成果を得た。ただし電気測定評価については、評価系の立上げに予想以上の時間を要し、目的に掲げた検討を行うことが出来なかった。この点については、現在、研究継続中である。

(1) 初期酸化表面酸化状態の放射光リアルタイム XPS による評価と「その場」STM による原子配列構造の解析【論文 5、6】

Si(110)-16×2 清浄表面の初期酸化過程を STM 及び XPS で観察し、16×2 再配列構造を構成するペンタゴンペアへの優先酸化を中心とする Si(110) 表面に特徴的な酸化構造を見出した。

(2) 酸化の時間発展と表面酸化モフォロジーとの関係【論文 1、3、4】

Si(110) 表面の熱酸化膜形成過程およびその界面結合状態をリアルタイム放射光電子分光により調べた。4 価の酸化状態が支配的な Si(100) 表面と異なり、Si(110) 面酸化では 3 価の酸化状態が、酸化開始直後から 1 原子層酸化膜の形成にいたるまで一貫して支配的であることを明らかにし、これが

Si(110)結晶構造に起因することを示した。

(3) 準安定酸素吸着状態の発見【論文2】

Si(110)-16×2表面への酸素分子初期吸着表面、及び300°Cアニール表面をSR-XPS及びSTM測定により調べた。アニールによって室温吸着酸素が熱酸化膜に近い酸化構造へと移動することを見出し、Si(110)-16×2表面への室温吸着酸素が準安定吸着状態であることを明らかにした。(図1)

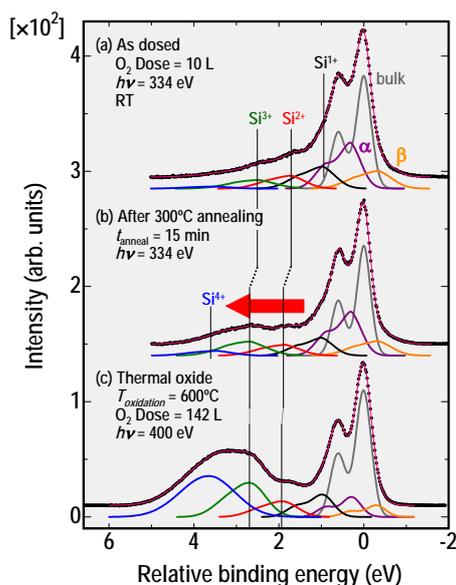


図1. 室温酸化Si(110)のSi2p XPSスペクトルとアニール効果

(4) 酸化に伴う応力発生のリアルタイム測定と酸化機構における応力の役割の解明【国内発表1】

Si(110)面の酸化過程に伴う表面歪を「その場」観察し、結晶構造を反映した異方性を伴う表面歪が発生することを初めて明らかにした。

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6件)

1. Initial oxidation of Si(110) as studied by real-time synchrotron-radiation x-ray photoemission spectroscopy

M. Suemitsu, Y. Yamamoto, H. Togashi, Y. Enta, A. Yoshigoe, Y. Teraoka

J. Vac. Sci. Technol. B **27**(1), Jan/Feb 2009

(査読有)

2. SR-PES and STM observation of metastable chemisorption state of oxygen on Si(110)-16×2 surface

Yoshihisa Yamamoto, Hideaki Togashi, Atsushi Kato, Yuya Takahashi, Atsushi Konno, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe, Hidehito Asaoka, Maki Suemitsu

Appl. Sur. Sci. **254** (2008) 6232-6234 (査読有)

3. Bonding Structure of Ultrathin Oxides on Si(110) Surface

Yoshihisa Yamamoto, Hideaki Togashi, Atsushi Kato, Maki Suemitsu, Yuzuru Narita, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe

Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1074-I03-50 (2008) (査読無)

4. Si(110)面上熱酸化膜形成時におけるSiサブオキサイド時間発展のXPSリアルタイム測定

山本喜久, 富樫秀晃, 今野篤史, 松本光正, 加藤篤, 齋藤英司, 末光真希, 寺岡有殿, 吉越章隆

電子情報通信学会技術研究報告 **108** (2008) 65-70 (査読無)

5. XPS and STM Studies on Initial Oxidation of Si(110)-16×2

Maki Suemitsu, Hideaki Togashi, Atsushi Kato, Yuya Takahashi, Atsushi Konno, Yoshihisa Yamamoto, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe, Hidehito Asaoka

Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **996H** (2007)

(査読無)

6. Observation of Initial Oxidation on Si(110)-16×2 Surface by Scanning Tunneling Microscopy

Hideaki Togashi, Yuya Takahashi, Atsushi Konno, Hidehito Asaoka, Maki Suemitsu

Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 3239-3243 (査読有)

[学会発表] (計13件)

1. Si(110)初期酸化時の化学結合状態および基板曲率のリアルタイム計測

山本喜久, 鈴木康, 宮本優, Roland Bantaculo, 末光真希, 遠田義晴, 寺岡有殿, 吉越章隆, 朝岡秀人, 山崎竜也

第63回応用物理学会東北支部学術講演会, 宮城, Dec. 5, 2008

2. Si(110)面上1原子層酸化膜の結合状態のSR-PESによる評価, 山本喜久, 富樫秀晃, 今野篤史, 松本光正, 加藤篤, 齋藤英司, 末光真希, 寺岡有殿, 吉越章隆, 第69回応用物理学会学術講演会, 名古屋, Sep. 2, 2008

3. Si(110)面上熱酸化膜形成時におけるSiサブオキไซด์時間発展のXPSリアルタイム測定, 山本喜久, 富樫秀晃, 今野篤史, 松本光正, 加藤篤, 齋藤英司, 末光眞希, 寺岡有殿, 吉越章隆 シリコン材料・デバイス研究会(SDM), June 10, 2008
4. Si(110)面上 1 原子層酸化膜の形成過程とその界面結合状態, 山本喜久, 富樫秀晃, 加藤篤, 末光眞希, 成田克, 寺岡有殿, 吉越章隆 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 千葉, Mar. 28, 2008
5. SR-PESとSTMによるSi(110)-16×2 室温酸化表面上の準安定状態の観察, 富樫秀晃, 山本喜久, 後藤成一, 高橋裕也, 中野卓哉, 今野篤史, 末光眞希, 朝岡秀人, 吉越章隆 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 千葉, Mar. 27, 2008
6. Bonding Structure of Ultrathin Oxides on Si(110) Surface, Yoshihisa Yamamoto, Hideaki Togashi, Atsushi Kato, Maki Suemitsu, Yuzuru Narita, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe 2008 Materials Research Society (MRS) Spring Meeting, San Francisco (USA), Mar. 24, 2008
7. Si(110)表面酸化・準安定吸着状態のSR-PES 観察, 山本喜久, 富樫秀晃, 末光眞希, 寺岡有殿, 吉越章隆, 第 3 回JAEA放射光科学研究シンポジウム, 兵庫, Feb. 28, 2008
8. Si(110)-16×2 面上極薄酸化膜形成過程とその界面構造, 山本喜久, 富樫秀晃, 加藤篤, 末光眞希, 成田克, 吉越章隆, 寺岡有殿, 第13回ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—, 静岡, Jan. 13, 2008
9. SR-PES Observation of Metastable Chemisorption State of Oxygen on Si(110)-16×2 Surface, Yoshihisa Yamamoto, Hideaki Togashi, Atsushi Kato, Satoshi Hasegawa, Takuya Nakano, Seiichi Goto, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe, Maki Suemitsu, Fifth International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-V), Tokyo, Nov. 13, 2007
10. Metastable Chemisorption State of Oxygen on Si(110)-16×2 Surface Observed by SR-PES Yoshihisa Yamamoto, Hideaki Togashi, Atsushi Konno, Satoshi Hasegawa, Takuya Nakano, Seiichi Goto, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe, Maki Suemitsu, 3rd International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, Nov. 9, 2007
11. Real-time monitoring of initial oxidation of Si(110)-16×2 surface by Si 2p Photoemission spectroscopy, Yoshihisa Yamamoto, Hideaki Togashi, Atsushi Konno, Satoshi Hasegawa, Seiiti Goto, Takuya Nakano, Maki Suemitsu, Yuzuru Narita, Akitaka Yoshigoe, Yuden Teraoka 2007 International Conference on Solid State Device and Materials, Ibaraki, Sep. 18-21, 2007
12. Si(110)-16×2 面のリアルタイムSR-XPS観測と自己触媒反応モデル, 山本喜久, 富樫秀晃, 今野篤史, 加藤篤, 末光眞希, 寺岡有殿, 吉越章隆, 第 68 回応用物理学学会学術講演会, 北海道, Sep. 7, 2007
13. Si(110)-16×2 表面の急速初期酸化現象と表面再配列, 富樫秀晃, 山本喜久, 後藤成一, 高橋裕也, 中野卓哉, 今野篤史, 末光眞希, 朝岡秀人, 吉越章隆, 寺岡有殿, 第 68 回応用物理学学会学術講演会, 北海道, Sep. 5, 2007
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
末光 眞希 (SUEMITSU MAKI)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号 : 00134057
- (2) 研究分担者
寺岡 有殿 (TERAOKA YUDEN)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射光科学研究ユニット・サブリーダー
研究者番号 : 10343922
- 朝岡 秀人 (ASAOKA HIDEHITO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹
研究者番号 : 40370340
- 遠藤 哲郎 (ENDO TETSUO)
東北大学・学際科学国際高等研究センター・教授
研究者番号 : 00271990
- (3) 連携研究者
なし