

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19840016
 研究課題名（和文） 新奇素子構築に向けたエピタキシャル金属／絶縁膜／シリコンカーバイドの創製
 研究課題名（英文） Construction of metal/insulator/SiC structure aimed for development of novel SiC device
 研究代表者
 氏名（アルファベット）：白澤 徹郎（SHIRASAWA TETSURO）
 所属機関・所属部局名・職名：東京大学・物性研究所・助教
 研究者番号：80451889

研究成果の概要：シリコンカーバイド(0001)基板上に成長させた結晶性シリコン酸窒化超薄膜の界面構造と電子状態を明らかにし、さらにその上への金属超薄膜の成長を試みた。X線回折法、光電子分光法、X線吸収・発光分光法、第一原理計算による検証の結果、絶縁膜と基板界面は原子レベルで急峻であり、理想的なバンドオフセット構造を有することを明らかにした。この成果は高性能 SiC-MOS デバイスへの適応を期待させるものである。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 1,350,000 | 0 | 1,350,000 |
| 2008 年度 | 1,350,000 | 405,000 | 1,755,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,700,000 | 405,000 | 3,105,000 |

研究分野：表面界面物性

科研費の分科・細目：数物系科学・物性

キーワード：シリコンカーバイド、表面界面、絶縁超薄膜

1. 研究開始当初の背景

ワイドバンドギャップ半導体である SiC は、その優れた物理特性から Si に替わる次世代半導体として注目されており、その電子デバイスへの実用化を目指した研究が盛んに行われている。しかしながら、従来法で形成された絶縁膜と SiC との界面における欠陥密度は非常に高く、MOS デバイスの実用化を阻む大きな要因となっていた。これに対し申請者等は、SiC(0001)上に結晶化した SiON 超薄膜がエピタキシャル成長することを見出していた。SiC 上にこのような結晶性の絶縁膜が形成した前例は無く、SiC の界面問題を解決するキーマテリアルとなることが期待され

たため研究に着手した。

2. 研究の目的

第一の研究目的は、SiON/SiC(0001)の界面構造及び電子状態を原子レベルで明らかにすることであった。MOS デバイスへの応用が期待されたため、デバイスの性能を左右する界面の性質を詳細に理解する必要があった。SiON/SiC(0001)の性質を理解できれば、次にその上に金属超薄膜を成長させ、超薄 MOS 構造を試作することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 界面構造は X 線回折法を用いて調べた。

SiON/SiC(0001)界面に由来する散乱強度分布を測定し解析することで、界面構造を明らかにすることができた。

(2) SiON/SiC (0001) の価電子状態と結合状態は光電子分光法を用いて調べた。界面電子状態は、X線吸収分光とX線発光分光法を組み合わせることで、元素選択的に調べた。さらに第一原理計算を行い、実験で得られた界面構造と電子状態について比較検討を行った。

X線回折は高エネ研 Photon Factory、光電子分光とX線発光分光は SPring-8、X線吸収分光は Saga-LS において行った。第一原理計算は東京大学理学部、常行研究室に依頼した。

(3) 金属超薄膜の成長は in-situ で高速電子線回折を観察しながら行った。

4. 研究成果

(1) X線回折法によって得られた SiON/SiC(0001)構造を図1に示す。X線散乱強度分布を詳細に解析した結果、界面に窒化シリコン層、その上に酸化シリコン層が成長していることが分かった。また図1から判るように SiON/SiC(0001)界面が原子レベルで急峻であることが分かった。また界面及び SiON 膜内に未結合原子が一切無いことがわかった。このような原子レベルで急峻な界面及び化学的に安定な構造を有する酸化膜/SiC界面の実現は初めてのことである。詳細な解析の結果、基板 SiC における格子歪はほぼ SiC bilayer 二層目までで終端していることが分かった。このような理想的な構造を有する酸化膜/SiC 界面の実現は他に類を見ない。第一原理計算によってもこの界面構造が安定であることが確かめられた。

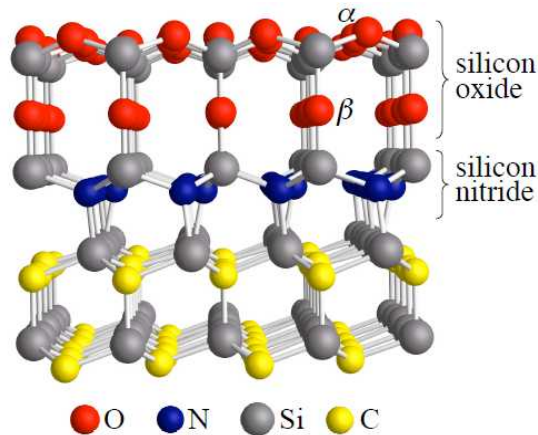


図1. 本研究で得られた SiON/SiC(0001) 構造

(2) 内殻光電子分光の結果、SiON 超薄膜に含まれる各元素の化学結合状態が明らかになった。この結果はX線回折で得られた界面構造と一致するものであり、構造および結合状態の確認が得られた。

また、価電子光電子分光を行った結果、第一原理計算によって得られた価電子バンド構造と一致する結果が得られた。さらに重要なことに、基板 SiC のバンドギャップ内に界面準位が存在しないことが明らかになり、従来の酸化膜/SiC 界面より優れた電子状態を有することが明らかになった。

X線吸収及び発光分光法によって元素選択的に調べた界面バンドオフセット構造を図2に示す。酸素と窒素原子のK吸収端に狙いを定めてX線吸収及び発光分光を行い、酸化シリコン層及び窒化シリコン層の価電子状態密度と伝導帯状態密度を調べた。この結果、SiON/SiC(0001)界面において急峻なバンドオフセットが確認でき、さらに伝導帯オフセットの大きさは理想的な SiO₂/SiC 界面における大きさと同程度であることが分かった。このような酸化膜/SiC 界面が実現されたのは初めてのことであった。このバンドオフセット構造は第一原理計算によっても確かめられた。また SiC 基板の界面近傍におけるバンドギャップの広がりもほとんど無いことが分かった。

これらの研究成果により SiON/SiC(0001)においては、MOS デバイスの性能を大きく左右する界面構造及びバンドオフセット構造が理想的な状態にあることが分かった。紺変えられた成果は、SiON/SiC(0001)界面を実用化に向けた将来展望への大きな足がかりとなった。

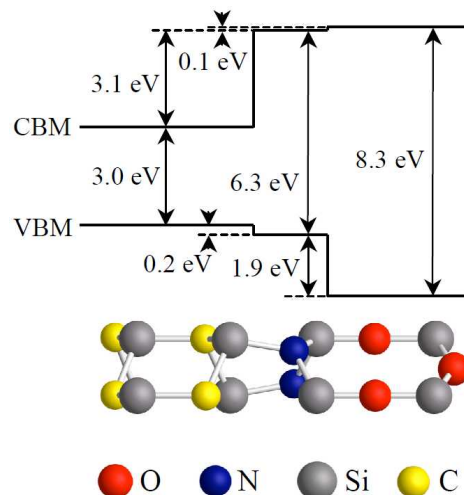


図2. 本研究によって得られた SiON/SiC(0001)のバンドオフセット構造

(3) 試作的な超薄 MOS 構造の作製として、SiON/SiC(0001)上への Al 超薄膜の成長を試みた。80 K まで基板を冷却して Al を蒸着すると layer-by-layer 様式で Al 膜が成長することが分かった。膜質および電子状態の詳細はまだ調べるに至っておらず、今後の課題として残った。

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 7 件)

Tetsuroh Shirasawa 他17名、

「Atomic-layer-resolved bandgap structure of an ultrathin oxynitride silicon film epitaxially grown on 6H-SiC(0001)」, Physical Review B rapid communication、査読有り、掲載決定

Toshio Takahashi, Tetsuroh Shirasawa, Kouji Sekiguchi, and Wolfgang Voegeli, 「Study of the Interface Structure of Epitaxial Ultra-Thin Film by an X-Ray Holographic Imaging Method」, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology、査読有り、第 7 巻、2009 年、525-528 ページ

Tetsuroh Shirasawa, Kouji Sekiguchi, Yusaku Iwasawa, Wolfgang Voegeli, and Toshio Takahashi 他 4 名、 「Interface Structure of an Epitaxial Iron Silicide on Si(111) Studied with X-Ray Diffraction」, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology、査読有り、第 7 巻、2009 年、513-517 ページ

T. Takayama, W. Voegeli, T. Shirasawa, K. Kubo, M. Abe, and T. Takahashi 他 2 名、 「Structural Study of the Si(553) Au Surface」, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology、査読有り、第 7 巻、2009 年、533-536 ページ

Wolfgang Voegeli, Toru Takayama, Kimitaka Kubo, Makoto Abe, Yusaku Iwasawa, Tetsuroh Shirasawa, and Toshio Takahashi 他4名、 「Surface X-ray Diffraction Study of the Metal-Insulator Transition on the Si(553) Au Surface」, e-Journal of

Surface Science and Nanotechnology、査読有り、第6巻、2008年、281-285ページ

水野清義, 白澤徹郎, 田中悟, 柝原浩, 「微傾斜 SiC(0001)表面上の酸素化シリコン薄膜の作製と低速電子回折による構造解析」, 応用物理、査読無し、第 77 巻、2008 年、1240-1243 ページ

白澤徹郎, 水野清義, 柝原浩, 田中悟, 「SiC 上の結晶化 SiON 超薄膜」, 固体物理、査読無し、第 43 巻、2008 年、231-237 ページ

[学会発表](計 9 件)

白澤徹郎, 「X線回折による MnSi/Si(111) 界面構造の研究」, 日本物理学会 第 64 回 年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学

白澤徹郎, 「SiON/SiC(0001)超薄膜の構造と元素選択的電子状態」, 日本物理学会 第 22 回日本放射光学学会、2009 年 1 月 12 日、東京大学本郷キャンパス

Tetsuroh Shirasawa, 「Interface structure of an epitaxial iron silicide on Si(111) studied with x-ray diffraction」, International symposium on surface science and nanotechnology、2008 年 11 月 12 日、早稲田大学

白澤徹郎, 「軟 X 線吸収・発光分光法による SiON/SiC(0001)のバンドオフセット構造の研究」, 日本物理学会 秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学

白澤徹郎, 「軟 X 線吸収及び発光分光法による SiON/SiC(0001)超薄膜の元素選択的電子状態の研究」, 日本物理学会 第 63 回 年次大会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学 本部 キャンパス

白澤徹郎, 「SiON/SiC(0001)超薄膜の放射光軟 X 線吸収・発光分光」, 第 21 回日本放射光学学会年会 放射光科学合同シンポジウム、2008 年 1 月 13 日、立命館大学 びわこ・くさつキャンパス

Tetsuroh Shirasawa, 「Dangling-bond-free ordered epitaxial SiON layer on a SiC(0001) surface」, The 9th international conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures、2007年11月1

4日、東京大学 駒場キャンパス

白澤徹郎、「SiC(0001)上のエピタキシャルSiON 超薄膜」第27回表面科学講演大会 第63回年次大会、2007年11月2日、東京大学 駒場キャンパス

白澤徹郎、「SiC(0001)上にエピタキシャル成長したSiON 超薄膜の電子状態」、日本物理学会 第62回年次大会、2007年9月22日、北海道大学 札幌キャンパス

6 . 研究組織

(1)研究代表者

白澤 徹郎 (SHIRASAWA TETSURO)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：80451889

(2)研究分担者

(3)連携研究者