

SiCパワーデバイスのトレンチMOS界面に導入された窒素のイメージングXAFS解析

磯村典武, 北住幸介, 片岡恵太, 朽木克博, 渡辺行彦

株式会社 豊田中央研究所

1. はじめに

SiCパワーデバイスは、Siを超える高耐圧、高速動作、高温での動作が可能となり、Siと同様に熱酸化により絶縁膜を作製できることから、次世代の金属酸化膜半導体 (Metal oxide semiconductor: MOS) 型パワーデバイスとして有望とされる^[1]。MOS型パワーデバイス構造として、基板表面に電極を埋め込んだトレンチ型は、従来のプレーナー型に比べて、オン抵抗を低減することができ、さらなる省電力化を図ることができることから注目されている。

キャリア移動度やしきい値電圧などの電気特性は、主にSiO₂/SiC界面の状態に支配されている^[2-4]。界面での炭素欠陥は、電気特性の低下要因とされており、その改善手法の一つとして、一酸化窒素 (NO) 中での加熱によって界面への窒素導入が行われている^[5]。窒素は界面のごく狭い範囲に存在し、Si-NやSi-O-N結合を形成していると言われているが、(0001) Si面でしか調べられてこなかった^[6-8]。トレンチ型MOS電界効果トランジスタ (Field-effect transistor: FET) が(0001)ウエハから作製される場合、キャリア移動はトレンチ側壁である(1-100) m面で起こる。X線吸収微細構造 (X-ray absorption fine structure: XAFS) 分析は、目的とする元素周辺の原子構造情報を提供する。我々は、測定が可能な広い平面を持つm面SiCウエハ (理想m面) を用いて、SiO₂/SiC界面に導入された窒素の原子位置 (サイト) を明らかにした^[9]。

ところが、エッチングにより形成されるトレンチのSiC側界面は理想m面と異なり傾斜や凹凸が存在し、導入された窒素が理想m面とは異なるサイトに位置している可能性がある。そこで、電流量が制御されるチャンネル領域を持つトレンチ側壁を直接分析することとした。ところが、トレンチ側壁はサブミクロンスケールの構造で形成されているため、従来のXAFSの適用は困難である。そこで、高空間分解能を有する光

電子顕微鏡 (Photoemission electron microscope: PEEM) を用いた。PEEMは、試料から発生する電子を100–200 nmの高い空間分解能で像として取得することができ、入射X線のエネルギーを掃引しながらPEEM像取得を繰り返すことによってイメージングXAFSが可能となる^[10]。

本研究では、PEEMを用いたイメージングXAFSをトレンチ側壁に適用することにより、SiO₂/SiC界面に導入された窒素の分析を試みた^[11]。ただし、窒素に対する分析深さが浅いため、試料をトレンチ部で劈開し、表面の酸化膜を取り除くことによってSiC側界面を測定した。なお、酸化膜を取り除いても窒素の状態は変わらないことが報告されている^[7]。

2. 実験

デバイス構造はフローティング型 (Floating Island and Thick Bottom Oxide Trench Gate MOSFET: FITMOS) であり^[12]、模式図とトレンチ側壁の走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscope: SEM) 像を図1に示す。ウエハをトレンチに沿って切断し (図1模式図の赤点線)、トレンチ内に残るゲート電極と酸化膜をフッ酸エッチングにより除去することでトレンチ側壁を露出させた。ただし、ゲート電極下

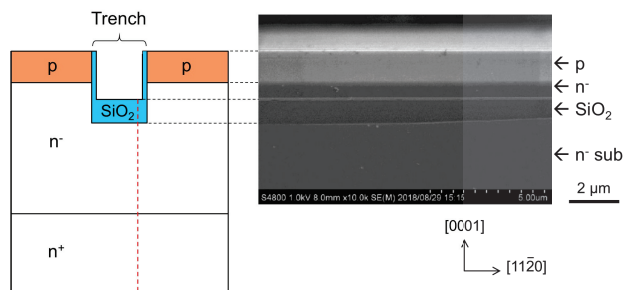


図1 トレンチMOS構造の模式図 (左) と切断後トレンチ側壁のSEM像 (右)。模式図中の赤点線は切断部を示す。

Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

部の埋込酸化膜は残っている状態である。図1のSEM像で見られるトレンチ側壁は SiO_2/SiC 界面の SiC 側 (m 面) であり、NO 処理 (1300°C、30 分) により界面に導入された窒素はチャンネル領域である p 層の表面に存在する。また、比較として m 面 SiC ウエハ上に、トレンチ試料と同様に SiO_2 膜の形成と NO 処理を施し、フッ酸エッチングにより SiO_2 を除去した試料 (理想 m 面) も用いた。

イメージング XAFS 測定は、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター (SAGA-LS) の軟 X 線ビームライン BL10 にて行った^[13]。検出器として用いた PEEM 装置は、Elmitec 社製 PEEMSPECTOR である。また、事前に窒素の存在を確認するために、オーグジュ電子分光法 (Auger electron spectroscopy: AES) を行った。

3. 結果及び考察

図2に、トレンチ側壁の各部を測定した AES スペクトルを示す。いずれの部位からも Si, C, および O が認められた。酸素を含む埋込酸化膜以外からも検出された O は、大気中で付着したコンタミ由来と考えられる。p 層からはそれらの元素に加えて N も検出され、p 層にのみ窒素が導入され、フッ酸エッチングによって取り除かれていないことが確認できた。

図3に、トレンチ側壁の PEEM 像を示す。n-層と埋込酸化膜は分離できていないが、コントラストによって p 層を捉えることができた。X 線エネルギーを

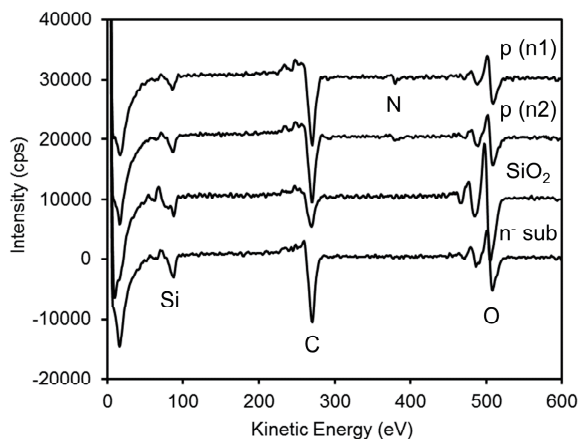


図2 トレンチ側壁各部の AES スペクトル

Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

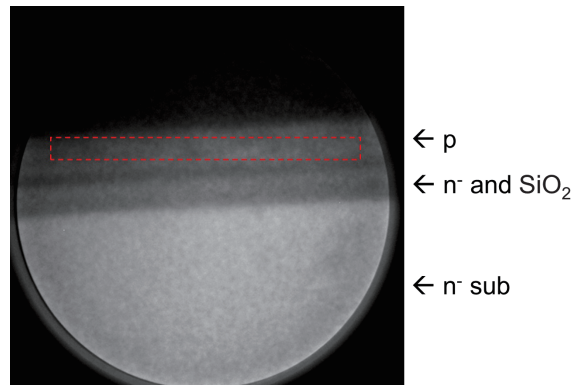


図3 トレンチ側壁のPEEM像 (視野径10 μm)。点線枠はXAFSスペクトルの抽出領域 ($\sim 8 \mu\text{m}$ [トレンチ長手方向] $\times \sim 0.7 \mu\text{m}$ [トレンチ深さ方向])を示す。

Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

掃引しながらエネルギーステップごとに PEEM 像を取得し、トレンチ側壁 p 層の $\sim 8 \mu\text{m}$ (トレンチ長手方向) $\times \sim 0.7 \mu\text{m}$ (トレンチ深さ方向) の領域 (図3の点線枠) の XAFS スペクトルを抽出した (図4)。

図4に、トレンチ側壁および理想m面における窒素の XAFS スペクトルを示す。吸収端 (立ち上がり) が窒素に帰属される 400 eV に認められ^[9]、窒素が導入されたトレンチ側壁を選択的に分析することができた。理想m面でのピーク位置が 404 eV であるのに対して、トレンチ側壁ではこれより低い 403 eV であった。これは、トレンチ側壁に導入された窒素が配置する格子/格子間サイトが理想m面のそれと異なることを示す。

原子構造の違いについては、次のように推定してい

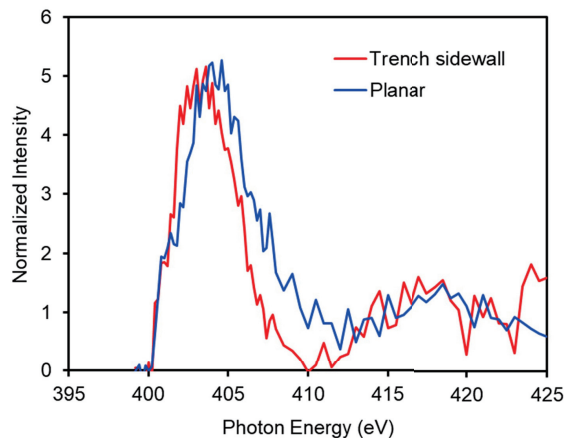


図4 窒素の XAFS スペクトル

Copyright (2020) The Japan Society of Applied Physics

る。実際のトレンチ側壁は垂直 (90°) になっておらず数度傾斜しているため、原子オーダーに近い平坦性があれば原子ステップが存在すると考えられる。また、トレンチ形成はドライエッチングで行われるため、度合いは不明であるが凹凸などが存在する可能性がある。このような原子ステップや凹凸の影響を受けて、導入される窒素の原子位置や窒素周りの構造が異なると考えている。

4. まとめ

PEEM を用いたイメージング XAFS を SiC パワーデバイスのトレンチ側壁に適用することにより、 SiO_2/SiC (m 面) 界面に導入された窒素の分析を試みた。トレンチ側壁の PEEM 像から窒素が存在する p 層を捉えることができ、抽出した窒素の XAFS スペクトルは理想 m 面と異なった。これは、トレンチ側壁に導入された窒素の原子構造が理想 m 面と異なることを示すものである。本手法がトレンチ型 SiC パワーデバイスの特性をよりよく理解することに役立ち、その高効率化に繋がることを期待する。

謝辞

PEEM を用いた XAFS 測定にあたり、多大なご協力をいただいた SAGA-LS の瀬戸山寛之博士と吉村大介博士に感謝の意を表します。

参考文献

[1] Z. J. Shen, I. Omura, "Power Semiconductor Devices for Hybrid, Electric, and Fuel Cell Vehicles", *Proc. IEEE* **95**, 778 (2007).
[2] J. Tan et al., "Metal-oxide-semiconductor capacitors formed by oxidation of polycrystalline silicon on SiC", *Appl. Phys. Lett.* **70**, 2280 (1997).
[3] N. S. Saks et al., "Interface trap profile near the band edges at the 4H-SiC/SiO₂ interface", *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2250 (2000).
[4] T. Kimoto et al., "Interface Properties of Metal-Oxide-Semiconductor Structures on 4H-SiC{0001} and (1120) Formed by N₂O Oxidation", *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 1213 (2005).

[5] K. Hamada et al., "Analysis of Nitrogen State on MOS Interface of 4H-SiC m-Face after Nitric Oxide Post Oxidation Annealing (NO-POA)", *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **15**, 109 (2017).
[6] C. Chang et al., "High-resolution elemental profiles of the silicon dioxide/4H-silicon carbide interface", *J. Appl. Phys.* **97**, 104920 (2005).
[7] R. Kosugi et al., "Fixed nitrogen atoms in the SiO₂/SiC interface region and their direct relationship to interface trap density", *Appl. Phys. Lett.* **99**, 182111 (2011).
[8] Y. Xu et al., "Atomic state and characterization of nitrogen at the SiC/SiO₂ interface", *J. Appl. Phys.* **115**, 033502 (2014).
[9] N. Isomura et al., "Distinguishing nitrogen-containing sites in the m face of 4H-SiC after nitric oxide annealing by X-ray absorption spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 051007 (2019).
[10] B. P. Tonner, D. Dunham, "Sub-micron spatial resolution of a micro-XAFS electrostatic microscope with bending magnet radiation: Performance assessments and prospects for aberration correction", *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **347**, 436 (1994).
[11] N. Isomura et al., "X-ray imaging and spectroscopy of nitrogen in the SiO₂/SiC interface of the 4H-SiC MOSFET trench sidewalls", *Appl. Phys. Express* **13**, 071005 (2020).
[12] H. Takaya et al., "Floating island and thick bottom oxide trench gate MOSFET (FITMOS) - a 60V ultra low on-resistance novel MOSFET with superior internal body diode", *Proc. 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, 43 (2005).
[13] D. Yoshimura et al., "New Soft X-ray Beamline (BL10) at the SAGA Light Source", *AIP Conf. Proc.* **1234**, 423 (2010).