

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289082

研究課題名(和文) 新しいヘテロ界面形成による高性能・省エネルギートランジスタの基盤構築

研究課題名(英文) Fundamental study of high-performance, low-power transistor by hetero interface formation

研究代表者

丹羽 正昭 (NIWA, Masaaki)

東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授

研究者番号：90608936

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：現代の深刻なエネルギー問題、特に電気エネルギーの観点から、ワイドギャップ半導体を用いた高性能・低消費電力型のパワーデバイス用MOSFETの基本的な課題、具体的には、1) Al, Ploy Si/SiO<sub>2</sub>/SiCキャパシタの絶縁破壊現象および、2) GaN/BP/Si(001)積層構造の結晶性評価を行った。

1)では、Si-MOSでは見られない特有の”絨毯爆撃状”絶縁破壊痕を確認し、その発生機構を電氣的、物理解析的に解明した。2)では、Si(001)直上のBPの結晶構造の乱れが、表面方向に沿って減少し、結晶性の良好なGaN層を形成するためには、欠陥の少ないBP表面が不可欠であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In regard to the current serious energy issue, especially from the electric energy point of view, fundamental study of high-performance, low-power MOSFET using wide band gap semiconductor, i.e., 1) Electric breakdown of Al, Ploy Si/SiO<sub>2</sub>/SiC capacitors and 2) Crystallinity of GaN/BP/Si(001) heterostructure was performed.

In case of 1), characteristic carpet-bombing-like concaves were observed by the dielectric breakdown and its developmental mechanism was clarified by means of electrical and physical analyses. This phenomenon is not observed for the conventional Si-MOS capacitors. For 2), number of defects of the crystal BP on Si(001) was found to decreased with increasing its thickness. And it was confirmed experimentaly that high quality BP buffer layer with minimized defets is imperative to obtain a high quality GaN crystal on the BP buffer layer on Si(001).

研究分野：電子デバイス界面制御、評価

キーワード：絶縁破壊機構 表面・界面物理解析 信頼性物理 ゲート絶縁膜 結晶性 ヘテロエピタキシャル成長 透過型電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

昨今のエネルギー問題を鑑み、ワイドギャップ半導体を用いたパワー-MOSFETの研究開発が活発であるが、Siデバイスに比べて高耐压用として注目されているSiCデバイスや高周波用途として期待されるGaNデバイスに関する形成プロセスを含め、電気的、材料物性的な詳細が必ずしも十分に明らかにされているわけではなく、これら半導体を用いた高性能で低コストのパワーデバイス実現が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究では、SiC MOS キャパシタの絶縁破壊現象に着目して、その現象と発生メカニズムを明らかにすること、さらに、BPを緩衝層としてSi(001)基板上にGaN層を形成したヘテロ構造の結晶性の評価を行うことにより高性能のSiCやGaNパワーデバイス実現に資することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) SiC MOS キャパシタの絶縁破壊による破壊痕の形成メカニズムの検討

オフ角4°である4H-SiC基板(0001)Si面上に厚さ10μmのn型エピタキシャル層を形成した基板を用いて、SiC MOS キャパシタを作製した。エピタキシャル層中の実効キャリア濃度とバルク基板の抵抗率は、それぞれ $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ と $0.02 \Omega\text{m}$ であった。洗浄した基板に1200の乾燥酸素雰囲気中に於いておよそ40nmのゲート酸化膜を成膜した後、窒素雰囲気中1200にてアニール処理を行った。その後、Al電極膜(膜厚400nm)もしくはpoly-Si(膜厚400nm)/Al(膜厚300nm)電極膜を成膜した(図1)。その後パターンニングを行い、SiC MOS キャパシタを作製した。デバイスエリアは、直径150μmの円形とした。

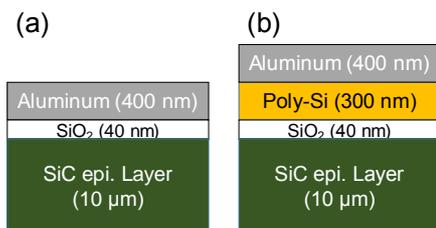


図1. (a) Al電極付きMOSキャパシタ (b) poly-Si/Al電極付きMOSキャパシタ

作製したSiC MOSキャパシタは、Agilent Technologies社製半導体パラメータアナライザB1505Aにて、タイムゼロ絶縁破壊(Time-Zero Dielectric Breakdown: TZDB)試験および経時劣化絶縁破壊(Time-Dependent Dielectric Breakdown: TDDB)試験を行った。

絶縁破壊試験後のキャパシタ表面は、電界放射型走査電子顕微鏡(Field-Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)および付帯するエネルギー分散型X線分光装置(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS)に

より評価分析を行った。

また、絶縁破壊後のキャパシタは、浜松ホトニクス社製エミッション顕微鏡PHEMOS-1000を用いて、発光解析およびOBIRCH(Optical Beam Induced Resistance Change)解析を実施した。

絶縁破壊の痕跡が見られる箇所や、特にエミッション顕微鏡により発光が見られる箇所において、FIB(Focused Ion Beam)/SEM Dual Beam装置を用いて、断面観察を行った。FIB/SEM Dual Beam装置による解析の一部は、筑波大学微細加工プラットフォームの支援を受けて実施した。特徴的な不良箇所においては薄片試料を作製し、断面を透過型電子顕微鏡(TEM)および付帯するEDSを用いて分析を実施した。

(2) Si(001)基板上にBP/GaN層を形成したヘテロ構造に関する研究

Si(001)基板上BP膜を成膜した後、GaNを成膜した(図2)。各試料の膜厚は表1に示す。FIB/SEM Dual Beam装置(FEI社製Dual Beam System FEI VERSA 3D)を用いて薄片化加工を行った後、透過型電子顕微鏡(JEOL社



図2. Si(001)/BP/GaN試料の断面構造

製JEM-ARM200F)を用いて観察を行った。本観察は、東北大学微細構造解析プラットフォームの支援を受けて実施された。

	BP層膜厚	GaN層膜厚
サンプル1	600 nm	なし
サンプル2	1000 nm	なし
サンプル3	300 nm	800 nm
サンプル4	600 nm	1000 nm

表1. 作製したSi(001)/BP/GaN試料

4. 研究成果

(1) SiC MOS キャパシタの絶縁破壊による絶縁破壊痕の形成メカニズムの検討

絨毯爆撃状破壊痕の形成過程モデル

TZDB試験もしくはTDDB試験により絶縁破壊した後のSiC MOSキャパシタの表面に形成される破壊痕には、多数のピットが形成されることを見出した。この多数のピットは連なり、まとまって形成されることが大きな特徴である(図3)。この破壊痕が形成された箇所においてFIB/SEM Dual Beam装置を用いて断面を観察すると、穴それぞれの大きさは深さが500nm程度、幅が1μm程度であることが分かった。

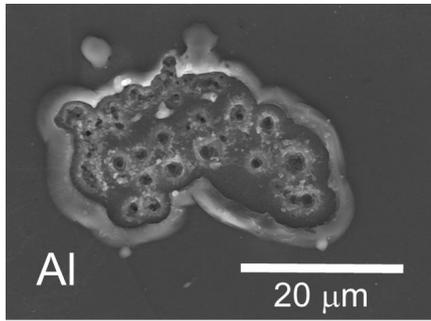


図3 . Al電極付き SiC MOS キャパシタの絶縁破壊後に表面に形成された絶縁破壊痕

また、SEM-EDS 分析により、穴が形成される前には存在していた電極膜も破壊痕の周辺において消失していることが分かった。これは、self-healing と呼ばれる現象であり、破壊箇所付近の電極膜が消失することで破壊されていないデバイスエリアから切り離される結果として、デバイスが破壊前の正常状態に戻る現象である。このように、1 つ 1 つの破壊痕において基板が大きくえぐれ、かつ破壊痕が連なって形成される現象は、Si MOS 構造ではこれまで見出されなかったものであり、その形成過程のモデルについて検討した。

ゲート電流 200 nA の定電流条件下において TDDb 測定を行った際、絶縁破壊時にキャパシタから放出されるエネルギーは、絶縁破壊前のゲート電圧  $V_1=45.3$  V と絶縁破壊後のゲート電圧  $V_2=0.34$  V、ゲート容量  $C_{ox}=20$  pF を用いて、

$$\Delta Q = 1/2 C_{ox} (V_1^2 - V_2^2) \quad (1)$$

から 20 nJ と計算された。

一方、1 つのピットを形成するために必要なエネルギーは、少なくとも 16.4 nJ と計算され、キャパシタの絶縁破壊時に放出されるエネルギー量とほぼ同等であることが分かった。一方、キャパシタ表面の破壊痕には多数

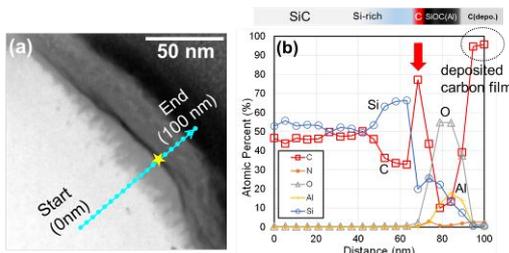


図4 . (a)破壊痕表面の HAADF-STEM 像 (b)破壊痕表面における TEM-EDS 線分析結果

のピットが形成されており、45 個のピットが形成された試料においてはすべての破壊痕を形成するためには 738 nJ (=16.4 nJ ×45) のエネルギーが必要である。以上の考察から、すべての破壊痕を形成するためには、絶縁破壊と self-healing が繰り返し発生することが必要であるとのモデルを提唱した。

#### 破壊痕表面の物理分析による破壊痕形成過程の熱力学的考察

絶縁破壊痕の断面 TEM 分析により、絶縁破壊痕表面での組成や構造の変化について調べ、絶縁破壊痕の形成モデルについて熱力学的に考察した。

絶縁破壊痕のピット底部の SEM-EDS 分析を行ったところ、SiC が露出した部分と比較して Si が多く存在することが分かった。破壊痕の穴の部分にて断面 TEM-EDS 分析を行った結果、穴の表面付近では C と比べて Si がより多く存在していることが分かった。また、穴の最表面には C 組成が大きな薄い層が存在することが分かった (図4)。TEM 観察を行うと、グラファイトと格子間隔がほぼ同じ層が数層観察された。

この結果から以下のように考察した。(i) 絶縁破壊時に生じたジュール熱により SiC 基板表面が十分に加熱され、SiC が昇華した部分が穴になった。(ii) 穴の最表面では、SiC が加熱され液相になった化合物と固相の炭素に分解した。(iii) 時間が経ち冷却される過程では、固相の SiC 基板と液相の化合物の界面から冷却され固相へと変化した。その過程にて、固相の炭素が表面へ析出した。

#### 絶縁破壊後のキャパシタに形成された導電パスの調査

絶縁破壊したキャパシタの表面を SEM を用いて観察すると、破壊痕の周辺の電極は絶縁破壊時のジュール熱により消失しており (図3)、絶縁破壊後の導電パスがどこに形成されているのかは不明であった。そこで、ウエハ裏面から発光解析および OBIRCH 解析を行うことで、導電パスの形成箇所の解析を行った。その結果、発光点が破壊痕のふちに見られることが分かった。この発光点において FIB/SEM Dual Beam 装置を用いて slice&view 解析を実施した結果、不良箇所を見出した。この不良は基板縦方向に細長く伸びた変質層であり、断面 TEM-EDS 分析から、ジュール熱により液化した Al 電極と SiC 基板が反応して、Al-C-Si 化合物が形成されている事が判明した (図5)。また、不良の底部に基板縦方向に伸びる欠陥が見出された。

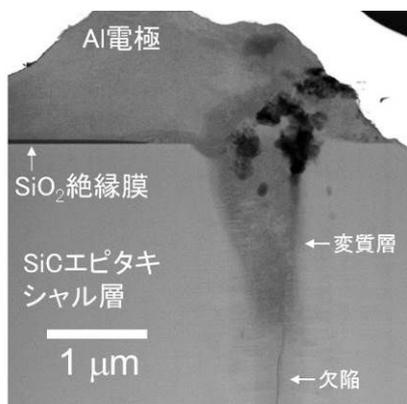


図5 . Al 電極付き SiC MOS キャパシタの発光点における HAADF-STEM 像

Poly-Si/Al 電極膜を用いたキャパシタについても同様に、絶縁破壊後に発光解析を行った結果、絶縁破壊痕のふちに発光が見られた。この発光点において FIB/SEM Dual Beam 装置を用いて slice&view 解析を行った結果、不良箇所が発見された。Al 電極膜の場合と異なるのは、電極膜と SiC 基板との反応がほぼ見られない点であった。一方、基板縦方向の欠陥については、Al 電極の場合と同様に観察された。

この結果は、絶縁破壊現象と SiC 基板中の欠陥との関係を示唆するものである。

#### (2) Si(001)/BP/GaN 試料の評価

Si(001)/BP 試料および Si(001)/BP/GaN 試料の断面 TEM 分析に関する検討

Si(001)基板上に BP 層を形成した試料、および Si(001)基板上に BP/GaN 層を形成した試料について、断面 TEM 観察を実施した。(試料詳細については表 1 を参照のこと)

BP 層のみ形成した試料では、BP 膜厚が厚くなるほど BP 膜表面における欠陥密度が低減する傾向であった。

また、BP 層上に GaN 層を形成した試料については、BP 層膜厚が厚いほど、即ち BP 層の欠陥密度が低いほど、結晶性のよい GaN 層が形成される傾向であった。

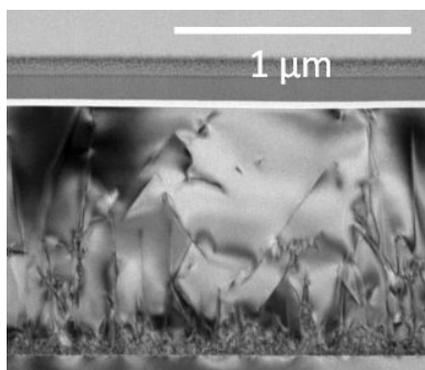


図6 . Si(001)/BP(1000 nm)試料の断面 TEM 観察像

## 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3件)

S. Sato, K. Yamabe, T. Endoh, M. Niwa, "Failure Analysis of a SiC MOS Capacitor with a Poly-Si Gate Electrode", Materials Science Forum (査読あり) 858, 485-488 (2016).

S. Sato, K. Yamabe, T. Endoh, M. Niwa, "Formation mechanism of concave by dielectric breakdown on silicon carbide metal-oxide-semiconductor capacitor", Microelectronics Reliability (査読あり) 58, 185-191 (2016).

S. Sato, Y. Hiroi, K. Yamabe, M. Kitabatake, T. Endoh, M. Niwa, "Multiple breakdown model of carpet-bombing-like concaves formed during dielectric breakdown of silicon carbide metal-oxide-semiconductor capacitors", Jpn. J. Appl. Phys. (査読あり) 53, 08LA01 (2014).

[学会発表](計9件)

佐藤創志, SiC MOS キャパシタに見られる絨毯爆撃状破壊痕、NWDTF in Sendai および通研共同プロジェクト合同研究会(招待講演)、2016年3月5日、東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター(宮城県仙台市)。

佐藤創志, 山部紀久夫, 遠藤哲郎, 丹羽正昭, Poly-Si 電極を用いた SiC MOS キャパシタの絶縁破壊後に見出した特徴的な破壊箇所、電子デバイス界面テクノロジー研究会 材料・プロセス・デバイス特性の物理 (第21回研究会) (査読あり)、2016年1月23日、東レ研修センター(静岡県三島市)、pp. 93-96.

S. Sato, K. Yamabe, T. Endoh, M. Niwa, "Failure analysis of SiC MOS capacitor with poly-Si gate electrode", 16th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (査読あり)、2015年10月8日、Giardini Naxos (Italy), Th-2A-2, 2015.

S. Sato, Y. Hiroi, K. Yamabe, M. Kitabatake, T. Endoh, M. Niwa, "Effect of series resistance on dielectric breakdown phenomenon of silicon carbide MOS capacitor", 22nd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (査読あり)、2015年6月30日、Hsinchu (Republic of China), 4-1.

佐藤創志, 廣井佑紀, 山部紀久夫, 北畠真, 遠藤哲郎, 丹羽正昭, SiC 熱酸化膜 MOS キャパシタの絶縁破壊痕表面における炭素の挙動、第61回応用物理学会春季学術講演会(査読なし)、2014年3月18日、青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市)、18a-E5-4.

佐藤創志, 廣井佑紀, 山部紀久夫, 北畠真, 遠藤哲郎, 丹羽正昭, SiC MOS キャパシタの TZDB 測定時動画撮影による絨毯爆撃状破壊

痕形成メカニズムの解明、第 62 回応用物理学会春季学術講演(査読なし)、2015 年 3 月 13 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市) 13a-A24-6 .

佐藤創志、廣井佑紀、山部紀久夫、北畠真、遠藤哲郎、丹羽正昭、SiC 熱酸化膜 MOS 構造における特徴的な絶縁破壊痕の解析とモデル化、ゲートスタック研究会 材料・プロセス・評価の物理 (第 19 回研究会)(査読あり)、2014 年 1 月 25 日、ニューウェルシティー湯河原(静岡県熱海市) pp. 111-114 .

S. Sato, Y. Hiroi, K. Yamabe, M. Kitabatake, T. Endoh, M. Niwa, "Carpet-bombing-like concaves on SiC MOS capacitors formed by dielectric breakdown", 2013 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ELECTRON DEVICES: SCIENCE AND TECHNOLOGY(査読あり)、2013 年 11 月 8 日、筑波大学東京キャンパス(東京都文京区) S4-3.

佐藤創志、廣井佑紀、山部紀久夫、北畠真、遠藤哲郎、丹羽正昭、熱酸化 SiC MOS キャパシタの絶縁破壊痕の形状評価、第 74 回応用物理学会秋季学術講演(査読無し)、2013 年 9 月 19 日、同志社大学京田辺キャンパス(京都府京田辺市) 19a-P9-3 .

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

丹羽 正昭 (NIWA, Masaaki)  
東北大学・国際集積エレクトロニクス研究  
開発センター・教授  
研究者番号：90608936

### (2)研究分担者

蓮沼 隆 (HASUNUMA, Ryu)  
筑波大学・数理物質科学研究科・准教授  
研究者番号：90372341

白石 賢二 (SHIRAIISHI, Kenji)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号：20334039

佐藤 創志 (SATO, Soshi)  
東北大学・国際集積エレクトロニクス研究  
開発センター・助教  
研究者番号：80649749

### (3)連携研究者

山部 紀久夫 (YAMABE, Kikuo)  
筑波大学・数理物質科学研究科・教授  
研究者番号：10272171