

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02781

研究課題名(和文) ワイドギャップ半導体(SiCおよびGaN) MOS界面欠陥の電子スピン共鳴分光同定

研究課題名(英文) Electron-spin-resonance characterization on interface defects at wide-gap semiconductor (SiC and GaN) MOS interfaces

研究代表者

藤ノ木 享英(梅田享英)(Umeda, Takahide)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：10361354

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)：高エネルギー効率社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスデバイスの高性能化のため、心臓部にあたる金属-絶縁膜-ワイドギャップ半導体(MOS)界面の未解明の界面欠陥を調査した。調査手法はシリコンMOS界面で実績のある電子スピン共鳴(ESR)分光法を用いた。対象となる半導体は、注目されている炭化ケイ素(4H-SiC)、窒化ガリウム(GaN)である。研究の結果、4H-SiC MOS界面の主要な界面欠陥の正体を明らかにすることができた。またGaN MOS界面では、界面欠陥の新しい定量方法を確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MOS界面欠陥の正体を突き止めることは、シリコンテクノロジーでは1970-80年代に行われ、これがその後のシリコン集積回路の発展の礎となった。同じようにワイドギャップ半導体でもMOS界面欠陥の正体を突き止めることは必要不可欠である。本研究は、炭化ケイ素(4H-SiC)において代表的なMOS界面欠陥の正体を突き止めることができた。窒化ガリウム(GaN)でも欠陥量を調べることでできる新しい手法を提案することができた。

研究成果の概要(英文)：We studied MOS (metal-oxide-semiconductor) interface defects of wide-band-gap semiconductors (4H-SiC and GaN), both of which are crucial in future low-energy-loss power electronics. The microscopic origins of the MOS interface defects have not been unraveled over two decades. Using electron spin resonance (ESR) spectroscopy, we have successfully identified the origins of major defects at 4H-SiC/SiO₂ interfaces. The most major one is named "PbC center", which is an interface carbon dangling bond, similarly to the famous Pb center (interface silicon dangling bond) at Si/SiO₂ interfaces. The PbC center causes the mobility degradation in SiC-MOSFET devices. For GaN, we studied GaN/SiO₂ and GaN/Al₂O₃ interfaces. In both types of interfaces, we found that interface states are stabilized into doubly-occupied states (ESR-inactive states). We have developed a new convenient technique for estimating the total number of the doubly-occupied interface states by using ESR spectroscopy.

研究分野：材料科学

キーワード：ワイドギャップ半導体 MOS界面 界面欠陥 炭化ケイ素 窒化ガリウム 電子スピン共鳴 ダングリン
グボンド

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ワイドギャップ半導体 (バンドギャップ $E_g > 2 \text{ eV}$) は、電気エネルギー制御を行うパワーエレクトロニクスに適している。現在の主流であるシリコン ($E_g = 1.1 \text{ eV}$) を炭化ケイ素 (4H-SiC、 $E_g = 3.3 \text{ eV}$) や窒化ガリウム (GaN、 $E_g = 3.4 \text{ eV}$) に置き換えると、既存の電気エネルギー利用システムのさらなる低エネルギー損失化が可能となる。さらには新時代の電気エネルギー利用形態を創出することも期待されている。例えば、その具体例を 4H-SiC パワー半導体が使用された日本の次期新幹線 N-700S に見ることができる。4H-SiC と GaN のパワーデバイスの中で、応用範囲の広さから主流と考えられているのが MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET) である。研究レベルでは 4H-SiC MOSFET、GaN-MOSFET の両方でシリコンのパワー MOSFET を上回る性能が実証され、それぞれ実用化および量産化もされている。しかし現状では 4H-SiC や GaN の物性限界を引き出したデバイスとはなっていない。特に MOSFET のエネルギー損失の大きな割合を占めるオン抵抗の低減が課題となっており、その抵抗の原因は「界面準位 (界面欠陥)」にあると考えられている。基本的に、界面準位を減らせば減らすほどオン抵抗は下がっていく。しかし 10 年以上 (4H-SiC では 20 年以上) にわたる研究でも、界面準位の起源はまだよく分かっておらず、対処療法的に界面準位を減らす工夫が行われているのが現状である。本研究は、この界面準位の正体を原子レベルで明らかにすることを目的にスタートした。

2. 研究の目的

MOSFET の心臓部となる MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 界面を原子レベルで調べて、そこに発生する界面準位の起源を明らかにすることが本研究の目的である。分析手法としては電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance: ESR) 分光を用いた。この手法は、先達となるシリコン MOSFET において MOS 界面欠陥を同定した実績をもつ。シリコン MOS 界面 (Si/SiO₂ 界面) の主たる界面欠陥は「P_b センター」と呼ばれる Si ダングリングボンド欠陥で、4H-SiC や GaN でも同種の欠陥があれば ESR 検出が可能である。しかし、ワイドギャップ半導体の界面準位は、広いバンドギャップゆえに、ESR では検出できない未占有準位や 2 電子占有準位になっている可能性が高くなっている。これらの準位を ESR で可視化するためには、MOS ゲートを使って界面準位の荷電状態を変える (電子を 1 個足す or 1 個減らして 1 電子占有準位にする) ことが本質的に重要で、そのためには MOSFET そのものを動作させながら ESR を測る必要がある。そのために本研究では、電流検出型 ESR (EDMR: Electrically Detected Magnetic Resonance) を使用した。EDMR は MOSFET を動作させながら、スピン依存キャリア捕獲プロセスを介して電流と相互作用する界面準位だけを ESR 検出することが可能である。ただし、EDMR は絶対定量性を失ってしまうので、「○○cm²」のような絶対定量がほしいところは通常の ESR 分光を用い、高感度測定で界面欠陥の起源を調べるときには EDMR 分光を使うという工夫を行った。

3. 研究の方法

(1) EDMR 分光: EDMR 分光装置はブルカーージャパン (株) の市販 X バンド ESR スペクトロメータ (ESP300 型、E500 型) を独自に改造したもので、市販装置のもつ高分解能と積算精度を生かしつつ、EDMR 測定ができるようになっている。本装置の検出系は、10 nA の試料電流に対して電流ノイズ密度 100 fA/sqrt(Hz) を達成して

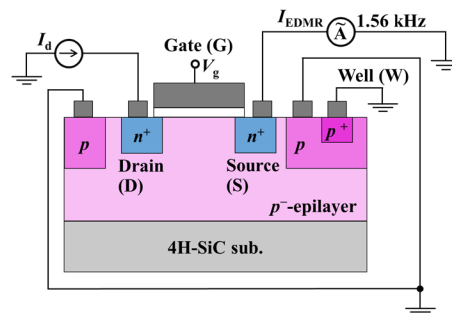
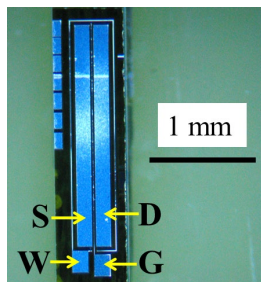


図1 SiC-MOSFET と、EDMR 分光セットアップ (文献[1]より一部変更して転載)。

おり (1.5 kHz 磁場変調時)、これは熱雑音の理論値 50 fA/sqrt(Hz) に近く、十分な性能を有していると判断される。測定は室温、マイクロ波 9.4 GHz/200 mW、磁場変調 1.5 kHz/0.2~1.0 mT 幅、試料電流 1 nA~10 μA の範囲で行った。さらに SiC-MOSFET では、界面信号を増幅することができる Bipolar Amplification Effect (BAE) -EDMR 法と呼ばれる測定法 (図1 参照) を適用した。外部磁場の印可方向を変えて界面欠陥の異方性・対称性も調査し、起源同定の根拠とした。

(2) ESR 分光: ESR 分光は、EDMR とは違って試料全体を観察するので、界面欠陥の観察においては下地基板からの ESR 信号の低減 (理想的にはゼロにする) が必須条件となる。本研究では、超低欠陥・不純物密度 (10¹⁴ cm⁻³ 台) の自立エピタキシャル 4H-SiC(0001) 基板を使用した。基板厚さを 100 μm とし、さらに基板表面の残留炭素からの ESR 信号を除去するために、表面ドライエッチング (10 nm 前後) を施した。その後、標準的な酸化前クリーニングを施してから標準熱酸化を施した (文献[2])。GaN ではこれほど高品質な自立エピ基板は得られないので、できるだけドーピング濃度が低い HVPE 基板 Ga 面に n 型エピ層 2 μm を形成し、標準的なクリーニングおよび絶縁膜形成を行った (Atomic Layer Deposition (ALD) 法による)。ESR 測定は前述の市販スペクトロメータ (E500 型) に高感度測定用の SHQ マイクロ波共振器 (Q 値 = 10000~12000)

と He クライオスタットを組み合わせて、4K～室温で行った。ESR 検出条件は、マイクロ波 9.4GHz/0.02～20mW、磁場変調は 100 kHz/0.2～1.0 mT 幅である。

(3) 4H-SiC MOSFET 試料： 研究分担者が所属する産業技術総合研究所・先進パワーエレクトロニクス研究センターで作製された。ノーマリーオフ n チャンネルのプレーナー4H-SiC MOSFET で、ゲート酸化膜は標準熱酸化 SiO₂ (厚さ 30～50 nm)。電界効果移動度 (最大値) は 6～90 cm²V⁻¹s⁻¹。4 度オフ 4H-SiC ウェハの Si 面または C 面上、またはインゴットから切り出した a 面または m 面上の高品質 p 型エピタキシャル層 (厚さ 5 μ m) に作製された。図 1 に EDMR 評価に使用したゲート長/幅 2000/5 μ m の 4H-SiC MOSFET を示した。

(4) GaN 試料： EDMR 用の GaN-MOSFET 試料は、研究協力者の所属する富士電機株式会社から融通していただいた。Ga 面上のゲート絶縁膜は堆積 SiO₂ で、厚さ 50nm。ノーマリーオフ n チャンネルのプレーナーGaN-MOSFET。電界効果移動度は最大 35 cm²V⁻¹s⁻¹ で、界面準位の比較的多い GaN-MOS 界面を有している。他方 ESR 用には、Si ドーピングの n 型 HVPE-GaN 基板 (Ga 面) を使用し、基板 ESR 信号の低減のために 100 μ m 厚までの薄膜化および両面 CMP 研磨を施した。4H-SiC のような表面エッチング処理は実施していない。

4. 研究成果

(1) 4H-SiC(0001)面 (Si 面) の界面欠陥「 P_{bc} センター」の解明： P_{bc} センターは 4H-SiC の標準面である Si 面で観測される 4H-SiC の典型的な界面欠陥である。ESR でも EDMR でも観測できるが、その起源同定のためには ¹³C 核スピンと電子スピンとの相互作用である「超微細分裂」を検出する必要があった。しかし超微細分裂信号は極めて微弱で、ESR では 4000 日を超える積算時間が必要と試算された (文献[2])。そこで感度に優れた EDMR を用い、試料および測定方法も最適化することで (図 1 参照)、ゲート面積 0.01 mm² の MOSFET 試料に対し、10 時間の積算で ¹³C 核スピン超微細分裂の測定が可能になった。

その測定結果が図 2 である。 P_{bc} センターには炭素 1 サイト分から発生する c 軸 ([0001] 軸) 対称の ¹³C 核スピン超微細分裂 (16～24 mT) に加えて、シリコン 3 サイト分から発生する等方的な ²⁹Si 核スピン超微細分裂 (6.6 mT) が観測された。このデータから P_{bc} センターは図 3 に示すような界面に垂直な炭素ダングリリングボンド欠陥 ($Si_3 \equiv C \cdot$ 構造、 \cdot は不対電子を表す) であることが確定した。同図には参考のために Si(111)/SiO₂ 界面の P_b センター ($Si_3 \equiv Si \cdot$) も示した。両者は互いによく似たダングリリングボンド欠陥であり、 P_{bc} の名の由来は、この類似性から来ている。つまり 4H-SiC はシリコンとよく似た界面欠陥を発生させることが本研究によって初めて明らかになった。

ダングリリングボンドは半導体表面/SiO₂ の格子ミスマッチ (SiO₂ の方が格子定数が大きい) によって不可避で発生する。ただし 4H-SiC(0001)では、Si 原子にダングリリングボンドが発生するのではなく、身代わりの炭素にダングリリングボンドが発生する。この炭素ダングリリングボンドは、図 3 で示したように「炭素アドアトム」上に発生している。炭素アドアトムは 3 つの Si 原子と

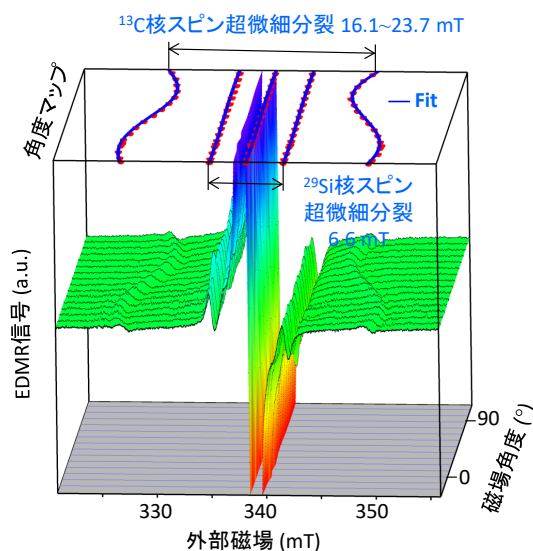


図 2 EDMR 分光による P_{bc} センターの ¹³C および ²⁹Si 核スピン超微細分裂の解析 (文献[3]より一部変更して転載)。

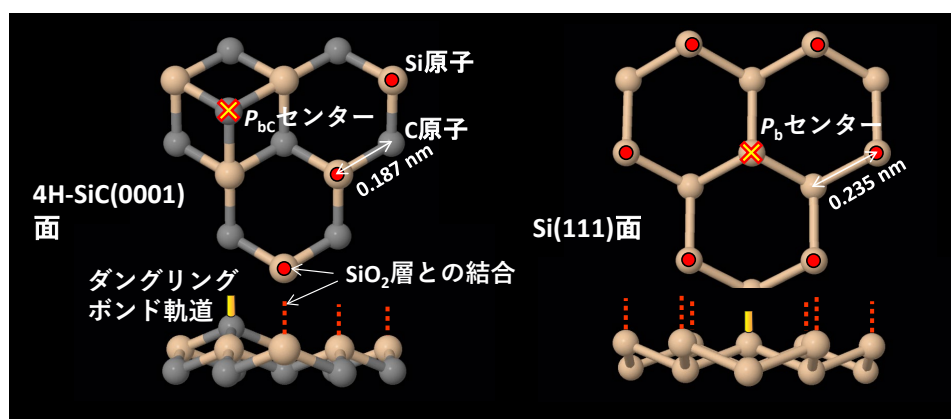


図 3 4H-SiC(0001)の P_{bc} センターと、Si(111)の P_b センターの比較 (文献[3]より一部変更して転載)。

結合しており、Si ダングリングボンドを 3 つ減らして、炭素ダングリングボンド 1 つにまとめる効果がある。4H-SiC(0001)は Si(111)よりも格子定数が小さく、最表面の Si 原子密度は約 50%大きい。その分、SiO₂ と結合できなくなる Si が増えるので、炭素アトムのような構造が有利となる。4H-SiC の熱酸化では自動的に余剰な炭素原子が界面から供給されるので、その一部が炭素アトムに転換していると考えられる。このようなモデルの正しさは、東京工業大学の松下雄一郎グループによって行われた第一原理計算 (488 原子スーパーセル、VASP+HSE06 計算) で検証済みである (文献[3])。

(2) 「P_{bc}センター」の電氣的影響と、プロセス依存性、面方位依存性： P_{bc}センターはダングリングボンド欠陥なので、中性状態から電子も正孔も捕獲することができる。その結果、n チャネル・p チャネルのどちらの MOSFET においても可動キャリアを減らし、移動度劣化 (正確には電界効果移動度の低下) を引き起こすと考えられる。また荷電したダングリングボンドはクーロン散乱体ともなり得る。実際、P_{bc}センターの密度 (ESR 法で定量) と、MOSFET の電界効果移動度との間には相関が見られた。

またシリコン MOS と同様に、面方位の変更による P_{bc}センターの劇的な低減も確認できた (図 4)。シリコンでは Si(111)から Si(100)に変更することによって P_bセンターの発生密度が 1 桁以上上がる。4H-SiC では Si 面から a 面 (1120)面)、m 面 ((1100)面)に変更することで 1 桁以上の P_{bc}センターの低減が観測された (図 4)。同時に電界効果移動度も大幅に向上する。ただし、これらの a 面や m 面は NO 窒化 (1250°C×60 分) を施している点に注意が必要である。

NO 窒化前のピュアな熱酸化界面と比較すると、a 面や m 面は電界効果移動度が測れないほど界面準位が多く、おそらく Si 面以上に大量の P_{bc}センターが発生しているものと推測される。なぜ多いのか、なぜ窒化後に Si 面よりも劇的に除去されるのかは今後の研究課題として挙げられる。Si 面の窒化界面では、窒化時間の増加に伴って窒素関連欠陥 (K センター (N₃≡Si・) と推測される) の増加が EDMR 分光で捉えられた (文献[1])。

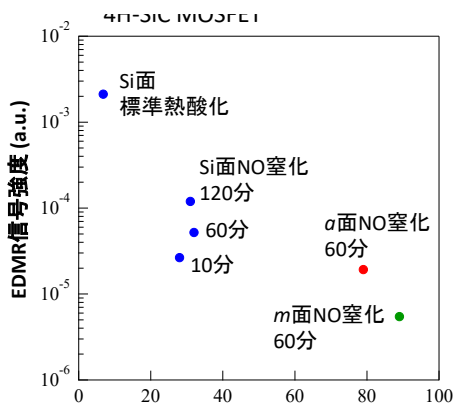


図 4 界面 EDMR 信号の面方位依存性 (文献[1]より一部変更して転載)。

(3) 4H-SiC(0001)面 (C 面) の界面欠陥の解明： Si 面に対して裏面にあたる C 面 4H-SiC では「C 面固有欠陥 (C-face defects)」と名付けた全く別種の界面欠陥がウェット酸化によって大量 (>10¹² cm⁻²) に発生する。また同界面においては、ゼロ磁場分裂を有する界面欠陥「P8 センター」 (文献[4]) や、室温で高輝度で発光する界面単一光子源 (密度は 10⁷ cm⁻²、文献[5]) も発見されている。このように C 面ウェット酸化界面は、Si 面との対比や、MOS 界面を利用した量子テクノロジー (量子センシングや量子コンピューティング) という面で非常に興味深い界面である。

この界面で発生する固有欠陥の起源を EDMR 分光で同定した結果が図 5 である。C 面固有欠陥は「界面の c 軸型 C_{Si}V_C (炭素アンチサイト-炭素空孔ペア)」、少数派の固有欠陥 P8 センターは「界面の basal 型 V_{Si}V_C (複空孔)」と同定された。前者も後者もバルクで同型の欠陥、HEI9/10 センター (c 軸型/basal 型 C_{Si}V_C)、P6/7 センター (c 軸型/basal 型 V_{Si}V_C) が存在する (図 5 の上部に示した欠陥)。C 面固有欠陥は HEI9 センターの界面型、P8 センターは P7 センターの界面型ということになる。なぜこれらの型が界面で発生するのかは、C 面ウェット酸化の反応メカニズムに深く関わっていると考えており (端的には酸化界面で起こる Si 原子の引き抜き反応)、文献 [4] で詳しく議論している。

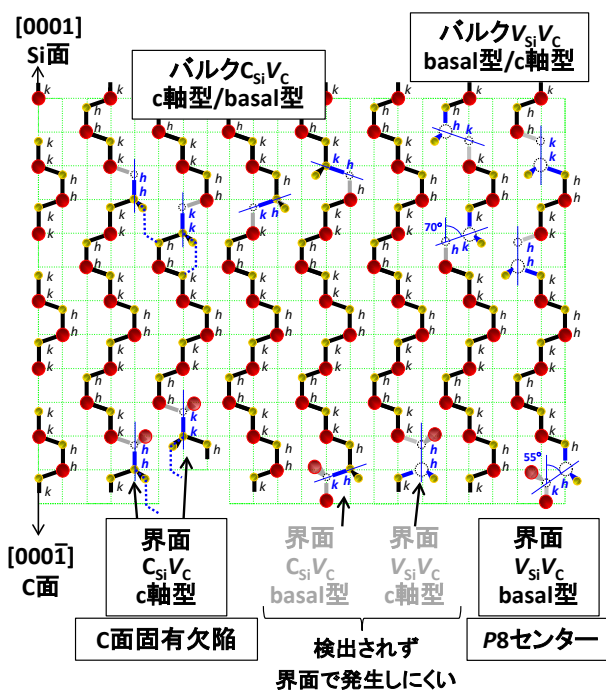


図 5 C 面 4H-SiC ウェット酸化界面の界面欠陥の同定 (文献[4]より一部変更して転載)。

(4) ¹⁵NO ガスを用いた窒化アニールによる窒素ドーピングの検証： 4H-SiC MOS 界面に窒化アニールを施した場合、窒素ドナーのカウンタードーピングが起こる可能性が指摘されている。事実、窒化アニールと類似した POCl₃ アニールでは P ドナーのドーピングが起こる

可能性がある。事実、窒化アニールと類似した POCl₃ アニールでは P ドナーのドーピングが起こる

ことを私たちは ESR で確認している (文献[6])。しかし NO アニールについては検出精度の問題で確認できなかったので、 ^{15}NO 同位体濃縮ガスを使った高精度分析を実施した (文献[2])。窒素には同位体比 100%の ^{14}N (核スピン 1) と、0%の ^{15}N (核スピン 1/2) が存在する。ESR ではこの核スピンの違いを見分けることができる。 ^{15}NO ガスを使って窒化アニールを行えば、4H-SiC 基板に元々入っている ^{14}N ドナーと、NO アニールによって後から入った ^{15}N ドナーを独立に ESR 定量することができる。 ^{15}NO 窒化 (1.1% ^{15}NO +98.9% N_2 , 1400°C×20 分) によって界面 P_{bc} センターが減少 ($-3\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) したことを確認した後、 ^{15}N ドナーを定量したところ ESR の検出限界以下 ($<2\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) だった。したがってカウンタードーピング効果は、 P_{bc} センター減少に比べて 1 桁以上量が少ないことが確認された。他方、 POCl_3 アニールでは P_{bc} 減少量と同レベルのドーピング量 ($\sim 2\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) が観測された。よって P ドナーのカウンタードーピングによる電界効果移動度向上は無視できない。その差が NO アニール後の電界効果移動度最大 30~40 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ と POCl_3 アニール後の同 100 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ につながっていると推測される。

(5) GaN における界面欠陥の EDMR : 使用した GaN-MOSFET は図 6(a)のような 3 電極タイプで基板電極をもたなかったため、4H-SiC MOSFET のような BAE-EDMR 法 (図 1 参照) は適用できなかった。そのため 4H-SiC よりも感度が制約された EDMR 評価となった。

図 6(a)は GaN-MOSFET のチャネル電流で測定した EDMR スペクトルで、 g 値 = 2.358 の非常にブロードな信号がゲート負バイアス下で検出された。これが GaN/SiO₂ 界面欠陥の信号だと考えられる。ゲート負バイアス下 (正孔供給下) でのみ検出されるということは、元々は 2 電子占有準位になっており、正孔捕獲で 1 電子占有準位に転換したことを意味している。4H-SiC の界面準位と違って信号線幅が数 10 倍も大きいので、その分、信号強度が著しく小さくなっている。GaN は 4H-SiC と違って 100%核スピン濃縮系 (Ga の核スピン保有率 100%、N の核スピン保有率 100%) なので、膨大な数の超微細分裂の発生によって ESR 信号線幅の著しい増大が起こり得る。実際、この現象はバルク GaN の ESR で確認されており、私たちの EDMR でも同様の現象が起きたと考えられる。得られた g 値と同じ、あるいは近い ESR 信号はバルク GaN では見つからない。したがって、少なくとも界面欠陥は、GaN バルク欠陥とは種類が大きく異なることが示唆される。

(6) GaN における 2 電子占有界面準位の定量 : EDMR の結果から、GaN/SiO₂ 界面準位は 2 電子占有化していることが示された。そのため通常の ESR 法を適用しても界面準位を観察することができないが、その量を簡便に調べる方法を本研究で開発した。

図 6(b)および(c)は、それを実際の試料でデモンストレーションした結果である。 n 型エピ層をもつ GaN 基板を用意する。この上に絶縁膜を形成すると、 n 型エピ層の Effective-mass ドナー (EM ドナー) のシャープな ESR 信号 (図 6(b)) の増減が観測されることが分かった。これは界面に発生した界面準位がドナー電子を吸収して 2 電子占有化したことによるものである。したがって、EM ドナーの増減量は界面準位密度の増減量と等しい。図 6(c)は、標準的な ALD 成膜法 (産業技術総合研究所の NPF 施設で実施、基板温度 300°C) による GaN/Al₂O₃ 界面と GaN/SiO₂ 界面とを比較したもので、界面電子トラップが GaN/Al₂O₃ で $3\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 増えている様子が捉えられた。絶縁膜形成方法や GaN 基板温度、基板表面処理を変えると、界面準位密度が変化することも確認した。この方法は、ESR を用いて簡便に界面準位密度を測る方法として有効である。

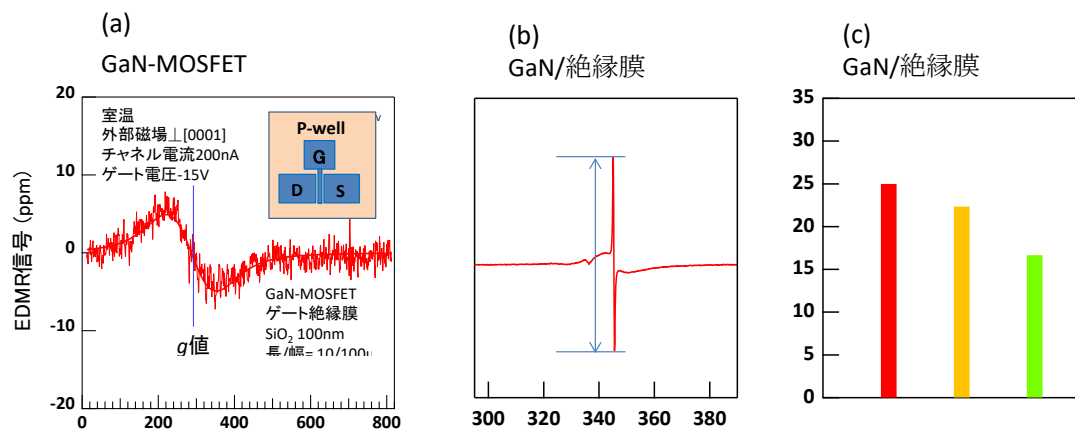


図 6 GaN-MOSFET の界面 EDMR 信号と、ESR による界面準位定量。

文献[1] E. Higa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 171602 (2020). [2] T. Umeda *et al.*, J. Appl. Phys. **127**, 145301 (2020). [3] T. Umedae *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 071604 (2020). [4] T. Umeda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **115**, 151602 (2019). [5] Y. Abe *et al.*, Appl. Phys. Lett. **112**, 031105 (2018). [6] T. Umeda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **113**, 061605 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 E. Higa, M. Sometani, H. Hirai, H. Yano, S. Harada, T. Umeda	4. 巻 116
2. 論文標題 Electrically detected magnetic resonance study on interface defects at nitrated Si-face, a-face, and m-face 4H-SiC/SiO ₂ interfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 171602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1063/5.0002944	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Umeda, Y. Nakano, E. Higa, T. Okuda, T. Kimoto, T. Hosoi, H. Watanabe, M. Sometani, S. Harada	4. 巻 127
2. 論文標題 Electron-spin-resonance and electrically detected-magnetic-resonance characterization on PbC center in various 4HSiC(0001)/SiO ₂ interfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 145301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1063/1.5134648	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Umeda, T. Kobayashi, M. Sometani, H. Yano, Y. Matsushita, S. Harada	4. 巻 116
2. 論文標題 Carbon dangling-bond center (carbon Pb center) at 4H-SiC(0001)/SiO ₂ interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 971604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1063/1.5143555	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Umeda, Y. Kagoyama, K. Tomita, Y. Abe, M. Sometani, M. Okamoto, S. Harada, T. Hatakeyama	4. 巻 115
2. 論文標題 Electrically detected-magnetic-resonance identifications of defects at 4H-SiC(000) / SiO ₂ interfaces with wet oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 151602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1063/1.5116170	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Umeda, G.-W. Kim, T. Okuda, M. Sometani, T. Kimoto, S. Harada	4. 巻 113
2. 論文標題 Interface carbon defects at 4H-SiC(0001)/SiO ₂ interfaces studied by electron-spin-resonance spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 61605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5041059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kagoyama, M. Okamoto, T. Yamasaki, N. Tajima, J. Nara, T. Ohno, H. Yano, S. Harada, T. Umeda	4. 巻 125
2. 論文標題 Anomalous carbon clusters in 4H-SiC/SiO ₂ interfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 65302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5066356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Umeda, M. Okamoto, H. Yoshioka, G.-W. Kim, S. Ma, R. Arai, T. Makino, T. Ohshima, S. Harada	4. 巻 80
2. 論文標題 Interface defects in C-face 4H-SiC MOSFETs: An electrically-detected-magnetic-resonance study	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 147,153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/08001.0147ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Abe, T. Umeda, M. Okamoto, R. Kosugi, S. Harada, M. Haruyama, W. Kada, O. Hanaizumi, S. Onoda, T. Ohshima	4. 巻 112
2. 論文標題 Single photon sources in 4H-SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 031105-1, -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4994241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Hatakeyama, Y. Kiuchi, M. Sometani, S. Harada, D. Okamoto, H. Yano, Y. Yonezawa, H. Okumura	4. 巻 10
2. 論文標題 Characterization of traps at nitrided SiO ₂ /SiC interfaces near the conduction band edge by using Hall effect measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 046601-1, -4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.046601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kobayashi, H. Ishimori, A. Kinoshita, T. Kojima, M. Takei, H. Kimura, S. Harada	4. 巻 56
2. 論文標題 Evaluation of Schottky barrier height on 4H-SiC m-face {1-100} for Schottky barrier diode wall integrated trench MOSFET	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 04CR08-1, -6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.04CR08	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 T. Umeda, Y. Nakano, E. Higa, H. Yano, M. Sometani, S. Harada
2. 発表標題 Carbon Pb center (the PbC center) at 4H-SiC(0001)/SiO ₂ interface
3. 学会等名 30th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Umeda, T. Kobayashi, Y. Matsushita, E. Higa, H. Yano, M. Sometani, S. Harada
2. 発表標題 The PbC (carbon dangling bond) center at 4H-SiC(0001)/SiO ₂ interface: An EDMR study
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kobayashi, T. Umeda, Y. Matsushita
2. 発表標題 The PbC (carbon dangling bond) center at 4H-SiC(0001)/SiO ₂ interface: A first-principles study
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Umeda, Y. Kagoyama, K. Tomita, Y. Abe, M. Sometani, M. Okamoto, T. Hatakeyama, S. Harada
2. 発表標題 Identifications of major and minor interface defects at C-face 4H-SiC/SiO ₂ interfaces with wet oxidation
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. Higa, M. Sometani, S. Harada, H. Yano, T. Umeda
2. 発表標題 Electrically-detected-magnetic-resonance study on interface defects at a-face and m-face 4H-SiC/SiO ₂ interfaces
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅田享英, 鹿児島陽平, 富田和輝, 阿部裕太, 岡本光央, 畠山哲夫, 原田信介
2. 発表標題 C面4H-SiCウェット酸化の特殊性と界面欠陥: EDMR分光からの知見
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成ヶ澤雅人, 比嘉栄斗, 染谷満, 畠山哲夫, 原田信介, 梅田享英
2. 発表標題 C面窒化4H-SiC/SiO2界面の電流検出型電子スピン共鳴分光
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比嘉栄斗, 染谷満, 原田信介, 矢野裕司, 梅田享英
2. 発表標題 4H-SiC Si面・a面・m面界面欠陥の電流検出型電子スピン共鳴分光法による評価
3. 学会等名 第6回先進パワー半導体分科会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Umeda, T. Hosoi, T. Okuda, T. Kimoto, M. Sometani, S. Harada, H. Watanabe
2. 発表標題 Electron-spin-resonance characterization on interface carbon defects at 4H-SiC/SiO2 interfaces formed by ultrahigh-temperature oxidation
3. 学会等名 European Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 梅田享英, 神成田巨平, 奥田貴史, 木本暢恒, 染谷満, 原田信介
2. 発表標題 4H-SiC(0001)/SiO2界面の炭素ダングリングボンド欠陥 (PbCセンター)
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鹿児島陽平、梅田享英、染谷満、原田信介、畠山哲夫
2. 発表標題 電流検出型電子スピン共鳴による(000-1)4H-SiC/SiO ₂ 界面炭素ダングリングボンドの検出
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 梅田享英
2. 発表標題 SiC-MOS界面欠陥の起源：電子スピン共鳴分光の最新の結果より
3. 学会等名 先進パワー半導体分科会第5回講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 梅田享英
2. 発表標題 電流検出電子スピン共鳴分光（EDMR）
3. 学会等名 学振145委員会「結晶加工と評価技術」第162回研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 G.-W. Kim, T. Okuda, T. Kimoto, T. Umeda
2. 発表標題 Interface carbon defect at Si-face 4H-SiC/SiO ₂ interfaces detected by electron spin resonance
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Abe, T. Umeda, M. Okamoto, R. Kosugi, S. Harada, M. Haruyama, W. Kada, O. Hanaizumi, S. Onoda, T. Ohshima
2. 発表標題 Oxidation-process dependence of single photon sources embedded in 4H-SiC MOSFETs
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Umeda, M. Okamoto, H. Yoshioka, G.-W. Kim, S. Ma, R. Arai, T. Makino, T. Ohshima, S. Harada
2. 発表標題 Interface defects related to threshold-voltage shift in C-face 4H-SiC MOSFETs: An EDMR study
3. 学会等名 232nd Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 梅田享英, 染谷満, 原田信介
2. 発表標題 15NOポストアニール後の4H-SiC MOS界面の窒素ドーピングのESR定量
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学・梅田研究室 (電子スピン共鳴分光研究室)
<http://esrlab.bk.tsukuba.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡本 光央 (Okamoto Mitsuo) (60450665)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	原田 信介 (Harada Shinsuke) (20392649)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究チーム長 (82626)	
研究協力者	上野 勝典 (Ueno Katsunori)		GaNデバイス作製
研究協力者	清水 三聡 (Shimizu Mistu)		GaN試料提供
研究協力者	染谷 満 (Sometani Mitsuru)		SiCデバイス作製