

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286054

研究課題名(和文)炭化ケイ素(SiC)MOS界面準位の起源と移動度劣化メカニズムの分光学的解明

研究課題名(英文)Electron-spin-resonance study on SiC-MOSFETs and their MOS interface defects related to channel-mobility degradation

研究代表者

藤ノ木 享英(梅田享英)(Fujinoki, 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) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：次世代パワーエレクトロニクス用の炭化ケイ素(4H-SiC)MOS型電界効果トランジスタ(MOSFET)の高性能化のために、4H-SiC/SiO<sub>2</sub>界面構造中の欠陥や不純物を原子レベルで調査した。方法は、SiC-MOSFET内部を直接観察することのできる電流検出型ESR(電子スピン共鳴)分光法を主に用いた。実用化に適していると考えられるSi面SiC-MOSFETでは窒素やリンのドーピングがチャネル移動度向上に大きく寄与していることを明らかにした。C面SiC-MOSFETではSi面とは全く異なる界面欠陥(C面固有欠陥と命名)がトランジスタの負の閾値変動に大きく寄与していることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We studied electrically-active defects in 4H-SiC MOSFETs (metal-oxide-semiconductor field-effect transistors) using electrically-detected magnetic resonance (EDMR) spectroscopy. The EDMR observations revealed that "channel doping" of nitrogen donors or phosphorous donors has a crucial role on the improvement of channel mobility in Si-face SiC-MOSFETs. On the other hand, in C-face SiC-MOSFETs, a different type of interface defect is dominantly formed, which we named "C-face defects." They have a crucial role on the threshold-voltage instability in C-face MOSFETs. The control of "channel doping" and "C-face defects" is key for commercializing high-performance and high-reliability SiC-MOSFETs.

研究分野：半導体物性

キーワード：パワーエレクトロニクス 4H-SiC MOSFET 界面準位 電子スピン共鳴分光 チャネル移動度 閾値変動

### 1. 研究開始当初の背景

炭化ケイ素 (SiC) は  $n$  型/ $p$  型の両方の伝導制御が容易なワイドバンドギャップ半導体 ( $E_g = 3.26$  eV) で、電気エネルギー制御を行うパワーエレクトロニクスに非常に適している。現在、使用されているシリコンよりも物理的限界が高く、SiC パワーエレクトロニクスが本格的に実用化されれば社会全体の電気エネルギー利用効率を改善することができ、CO<sub>2</sub> 削減効果は日本全体でマイナス 1% 台に達すると見積られている。SiC パワーデバイスのうち汎用性が高く最も期待されているのが SiC-MOSFET (4H-SiC MOSFET、MOSFET は MOS 型電界効果トランジスタの略) である。SiC-MOSFET の高い性能はすでに実証されているが、SiC 自身もつとされる性能には遠く及んでいない。その主原因は SiC-MOSFET の心臓部たる SiC-MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 界面の欠陥にあると考えられている。この界面欠陥によってチャンネル移動度の低下や閾値電圧 ( $V_{th}$ ) の変動が生じ、SiC-MOSFET 本来の性能がフルに発揮されなくなっている。したがって界面欠陥の低減や除去、そして界面欠陥の起源の解明が望まれているが、10 年以上に及ぶ多数の研究にもかかわらず、その起源は不明のままである。本研究は、結晶欠陥の起源を原子レベルで同定できる電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance: ESR) 分光法を使って SiC-MOS 界面欠陥を調べ、それらが MOSFET のどんな性能をどのように左右しているのかを明らかにしようとした。

### 2. 研究の目的

SiC-MOSFET 中の MOS (4H-SiC/SiO<sub>2</sub>) 界面の欠陥について、その起源と、MOSFET の性能への影響を明らかにすることを目的とする。用いた実験手法は ESR 分光法であるが、本研究の前に ESR 法による調査は数多く行われていて、通常の ESR 法では MOS 界面欠陥がほとんど見えないことが分かっている。したがって本研究は新しいアプローチとして、SiC-MOSFET を直接調べることでできる電流検出型 ESR 分光法 (Electrically Detected Magnetic Resonance: EDMR) を用いた。EDMR 分光法は電流を流しながら、あるいはゲート電界をかけながらの ESR 測定が可能で、通常の ESR 法では見ることのできない欠陥を検出することができる。しかも、デバイスを直接評価することができるので、チャンネル移動度や閾値変動などの電気特性と欠陥を直接結び付けることが可能である。また微小な半導体デバイスでも欠陥を検出することのできる高い検出感度も併せ持っている。EDMR のもつこれらの特徴を生かせば、本研究の目的を十分に達成できると判断した。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究で使用する EDMR 分光装置は市販の ESR スペクトロメータ (ブルカーパイオ

スピン社 ESP300) を独自に改造したもので、市販装置のもつ分光計としての分解能や精度を生かしつつ EDMR 測定ができるようになっている。本装置の検出系の電流ノイズ密度は、10 nA の試料電流に対して 100 fA/sqrt(Hz) を達成しており (1.5 kHz 磁場変調検出を使用)、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/変調幅 0.2 ~ 1.0 mT、試料電流 10 nA 前後で行った。外部磁場は最大 800 mT まで印可し、4H-SiC 結晶の [0001] 軸から [11-20] 軸にかけて磁場を回転させて、欠陥の異方性を解析した。ここに掲載する EDMR スペクトルは全て磁場を [0001] 軸に合わせたときのスペクトルである。

(2) EDMR 測定を行う SiC-MOSFET は、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。N チャネル横型の 4H-SiC MOSFET で、ゲート絶縁膜厚約 50nm、ゲート長/幅 = 100/150  $\mu$ m である。4H-SiC ウェハの Si 面、C 面の高品質エピタキシャル層 (5  $\mu$ m 厚) にそれぞれ作製された。図 1 に 4 種類の SiC-MOSFET の  $I_D$ - $V_G$  曲線 (ドレイン電流-ゲート電圧曲線) と電界効果移動度を示す。

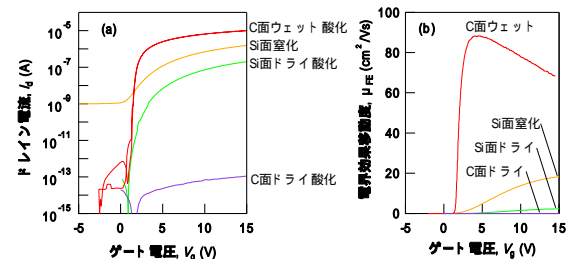


図 1 EDMR 分光評価をした 4 種類の SiC-MOSFET の伝達特性と、伝達特性から算出した電界効果移動度。

### 4. 研究成果

(1) Si 面 MOS 界面欠陥の起源と、窒化処理による除去: 図 1 に見られるように Si 面 MOSFET ではドライ酸化膜形成後に窒化アニール (NO ガスで 1250 °C、30 分間アニール) を加えるとチャンネル移動度の向上が見られる。現在、実用化されている SiC-MOSFET は Si 面窒化を利用したものである。よって Si 面では界面と窒素との反応、窒素の役割を解明することが重要となる。Si 面のドライ酸化 MOSFET で測定した典型的な EDMR スペクトルが図 2(a) である。電子スピンの  $g$  値 (gyromagnetic factor) が 2.0025 (等方的) と 2.009 (異方的) の 2 種類の欠陥が見えている。このうち 2.0025 信号は「カーボン欠陥」の信号で、アモルファスカーボンや多結晶ダイヤモンド等で見られる炭素ダンダリングボンド信号と類似している。界面に発生した炭素集合体中の炭素ダンダリングボンドの信号と考えている。2.009 信号は  $g$  値の特徴から Si 原子で構成される欠陥 (Si ダングリングボ

ドなど)と考えられるが、信号強度が小さいために詳しい説明には至っていない。どちらの信号も窒化処理後は 1/2 ~ 1/3 に減少する。したがって、窒化処理の役割の 1 つは界面の 2 種類の欠陥を除去することであると結論される。

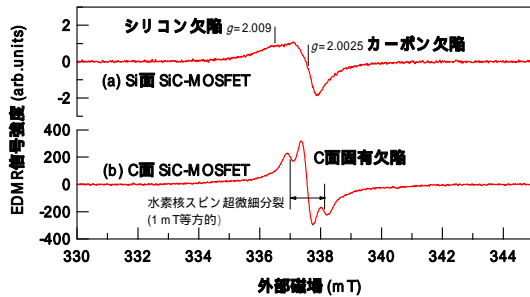


図2 SiC-MOSFET の EDMR スペクトル。Si 面(ドライ酸化)と C 面(ウェット酸化)で違う欠陥が観測される。

(2) Si 面 MOSFET の窒化処理による窒素ドーピングと、移動度劣化との関係：窒化処理のもう 1 つの重要な役割が「窒素ドーピング効果」である。チャンネルに窒素ドナーをドーピングすることでチャンネルの電気伝導度が上がり、移動度が向上したように見えるというものである。窒素ドナーの発生は、私達の低温 EDMR 測定によって証明されている (T. Umeda *et al.*, Appl. Phys. Lett. 99, 142105 (2011))。しかし EDMR ではドナー密度の定量ができないので、本研究では通常 ESR を用いて窒素ドーピングの定量を試みた。残留窒素濃度が極めて低い ( $< 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) 高純度の自立 P 型エピタキシャル 4H-SiC 基板(京都大学木本・須田研究室よりご提供)を使用することでこれが可能になった。この特殊な基板で窒化処理後にドーピングされた窒素ドナーの ESR 定量を行ったところ面密度が  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、体積密度が  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (ドーピング厚さを 3 nm と仮定) と見積もられた。窒素ドーピングによって移動度は向上するが、逆に、窒素ドナーがキャリアのクーロン散乱源となって移動度を低下させる効果も考えられる。4H-SiC バルクの電子移動度のドーピング濃度依存性から推定すると、 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  のドーピング密度では  $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ~  $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  の移動度劣化が予想される。現実には  $20 \sim 30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  まで劣化しているので、ドナーによる移動度劣化だけでなく、その他の劣化メカニズムがないと説明はできない。例えば (1) で説明したカーボン欠陥や、伝導帯端近傍にある浅い界面準位がキャリアの散乱源になっているのではないかと推測される。

(3) リンを導入した Si 面 MOSFET のリンドーピングと、移動度劣化との関係：窒素と似たような働きをする原子としてリンが知られている。Si 面 MOS 界面を  $\text{POCl}_3$  アニール (1000 °C) して界面にリンを導入すると、最大  $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  という高い電界効果移動度が得られる。これもドーピング効果で説明でき

るのではないかと考え、(3)と同様の方法でリンドーピング密度の定量を行った。その結果、リンドーピング密度は窒素の場合よりも 1 桁高い  $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と見積もられた。したがって、窒素よりも高い移動度向上効果が期待できる。この場合、4H-SiC の電子移動度は  $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ~  $100 \sim 150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  まで低下することが予想される。これは実際の MOSFET の電界効果移動度 ( $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) にほぼ等しいので、 $\text{POCl}_3$  アニール SiC-MOSFET の移動度劣化はリンドーピングによってほぼ説明できる。

(4) ウェット酸化をした C 面 MOSFET の界面欠陥 (C 面固有欠陥) と、閾値変動との関係：図 2(b) はウェット酸化した C 面 SiC-MOSFET の EDMR スペクトルであり、Si 面とは違う種類の巨大な EDMR 信号が観測されている。つまり、C 面には Si 面とは別種の欠陥が大量に発生していることが分かった。この欠陥を私達は「C 面固有欠陥」と命名した。この欠陥信号はゲート電圧を負バイアスした時にだけ観測される。これは C 面固有欠陥が正孔トラップであることを示している。さらに、この欠陥は水素終端されており、ガンマ線照射によって水素脱離を引き起こすと EDMR 信号の増加が確認された。同時にトランジスタの負の閾値変動が大きくなった (図 3)。さらに、閾値変動が特に大きなタイプ (Bad type と命名) と安定しているタイプ (Good type と命名) の EDMR 信号を比較したところ、安定しているタイプは 1 桁以上、信号が小さくなっていった。以上の結果から、C 面固有欠陥は C 面の負の閾値変動の原因欠陥であることが示唆された。

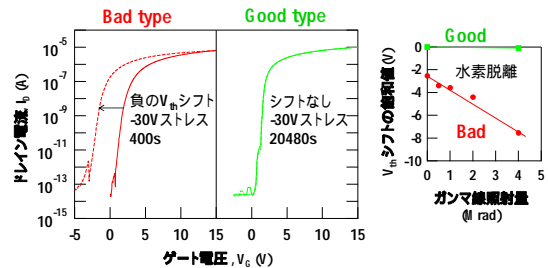


図3 C 面 MOSFET で観測される負の閾値変動と、水素脱離との関係。

(5) C 面固有欠陥のエネルギー準位と密度：MOSFET のゲート電圧  $V_G$  を操作すると MOS 界面のフェルミ準位  $E_F$  が上下し、C 面固有欠陥の荷電状態が変わる。それに合わせて EDMR 信号も増減する。したがって EDMR 信号の  $V_G$  依存性を解析すれば、この欠陥のエネルギー準位  $E_T$  や密度  $N_T$  を見積もることができる。デバイスシミュレーションで  $E_T$ 、 $N_T$  がいくつであれば EDMR 信号の  $V_G$  依存性が説明できるかを探索したところ、 $E_T$  はドナー準位 ( $E_T < E_F$  では中性、 $E_T > E_F$  では正荷電) で、 $E_T < E_V + 1.0 \text{ eV}$  であり、Bad type の  $N_T$  は  $1.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、Good type では  $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  と求められた。C 面固有欠陥は  $V_G \geq 0 \text{ V}$  では

2 電子占有/中性状態となっているため、大量に存在しても移動度には全く影響を与えない。 $V_G < 0V$  では正孔をトラップして正荷電状態となり、負の閾値変動を引き起こす。

(6) C 面固有欠陥の起源の解析：C 面固有欠陥には炭素 1 個分から発生する  $^{13}C$  核スピン超微細分裂が観測された(図 4)。炭素 1 個を核とする欠陥であると結論される。

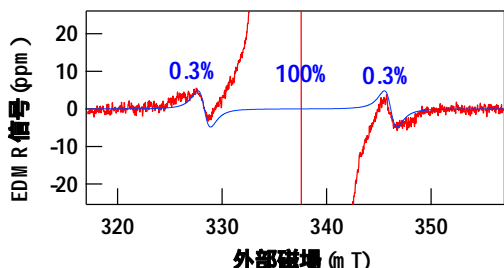


図 4 C 面固有欠陥の EDMR 信号で観測された  $^{13}C$  核スピン超微細分裂。

(7) ドライ酸化をした C 面 MOSFET の界面欠陥 (カーボン欠陥) と、その重要性：C 面をドライ酸化すると MOSFET は全く動かない(図 1)。これは大量の界面欠陥の発生を意味している。その欠陥の起源を EDMR で調べたところ、ウェット酸化とは種類が全く違うことが分かった。C 面ドライ酸化 MOS 界面で観測された信号は等方的な”カーボン欠陥信号”(Si 面の 2.0025 信号と同一と見られる)であった。ドライ酸化とウェット酸化の違いは、一般には「欠陥の水素終端」で語られることが多いが、EDMR の結果からは「発生する欠陥の種類の違い」が根源的ではないかと考えられる。同じような欠陥が Si 面でも観測されており(図 2(a)) Si 面の移動度劣化にも影響を与えている可能性がある。本研究の共同研究者によって Si 面や C 面に代わる新しい面 ( $a$  面、 $m$  面)が研究されているが、今後、これらの面でも”カーボン欠陥”に着目した界面欠陥解析が有効なのではないかと考えられる。

(8) 容量検出型 ESR 分光法 (Capacitively Detected Magnetic Resonance: CDMR) の開発：CDMR 分光は EDMR 分光の派生技術の 1 つで、2000 年に発表されて以来、実施例のない非常に珍しい実験である。本研究は SiC-MOS 界面への適用を目指して CDMR 分光法の開発も行った。2000 年の論文に倣って CDMR 分光装置を開発し、最終的に図 5 のように CDMR 信号の検出に成功した。CDMR 分光の 1 つの特徴は、信号強度から検出した欠陥数を定量できることである。本研究では  $280 \pm 50$  個となった。2000 年の論文では 2000mW のマイクロ波励起で  $400 \pm 50$  個の欠陥を検出しているので、同程度以上の CDMR 分光装置が完成したことが確認できた。

(9) SiC-MOS 界面の発光欠陥の発見：MOS

界面の光学的分析を狙って、本研究で調査した SiC-MOS 界面を 532 nm レーザー走査型共焦点蛍光顕微鏡で観察したところ、界面に  $1 \sim 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  の単一発光欠陥を発見した。起源は不明であるが、MOS 界面の解析に利用できるのではないかと考え、調査を進める所存である。

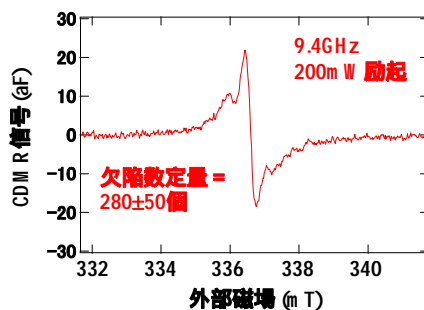


図 5 容量検出 ESR (CDMR) スペクトル。試料は C 面ウェット酸化 SiC-MOSFET。

## 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 12 件)

G. W. Kim, R. Arai, S. J. Ma, M. Okamoto, H. Yoshioka, S. Harada, T. Makino, T. Ohshima, T. Umeda, Electrically detected magnetic resonance study on interface defects responsible for threshold-voltage shift in C-face 4H-SiC MOSFETs, Materials Science Forum, 査読有, vol.858, 2016, pp.591-594.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.858.591

Y. Kagoyama, M. Okamoto, S. Harada, R. Arai, T. Umeda, Microscopic difference between dry and wet oxidations of C-face 4H-SiC MOSFETs studied by electrically detected magnetic resonance, Materials Science Forum, 査読有, vol.858, 2016, pp.619-622.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.858.619

K. Murakami, S. Tanai, T. Okuda, J. Suda, R. Kimoto, T. Umeda, ESR study on hydrogen passivation of intrinsic defects in p-type and semi-insulating 4H-SiC, Materials Science Forum, 査読有, vol.858, 2016, pp.318-321.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.858.318

K. Ariyoshi, R. Iijima, S. Harada, K. Kozima, J. Senzaki, Y. Tanaka, K. Takao, T. Shinohe, Systematic investigation on in-plane anisotropy of surface and buried channel mobility of metal-oxide-semiconductor field-effect-transistors on Si-,  $a$ -, and  $m$ -face

4H-SiC, Applied Physics Letters, 査読有, vol.106, 2015, p.103506 (3 ページ).  
DOI: 10.1063/1.4914385

S. Castelletto, B. C. Johnson, V. Ivady, N. Stavrias, T. Umeda, A. Gali, T. Ohshima, A silicon carbide room-temperature single-photon source, Nature Materials, 査読有, vol.13, 2014, p.151 (6 ページ).  
DOI: 10.1038/NMAT3806

D. Okamoto, M. Sometani, S. Harada, R. Kosugi, Y. Yonazawa, H. Yano, Improved channel mobility in 4H-SiC MOSFETs by boron passivation, IEEE Electron Device Letters, 査読有, vol.35, 2014, pp.1176-1179.  
DOI: 10.1109/LED.2014.2362768

T. Umeda, M. Okamoto, R. Arai, Y. Satoh, R. Kosugi, S. Harada, H. Okumura, T. Makino, T. Ohshima, C-face interface defects in 4H-SiC MOSFETs studied by electrically detected magnetic resonance, Materials Science Forum, 査読有, vol.778-780, 2014, pp.414-417.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.414

T. Kojima, S. Harada, K. Ariyoshi, J. Senzaki, M. Takei, Y. Yonezawa, Y. Tanaka, H. Okumura, Reliability improvement and optimization of trench orientation of 4H-SiC trench gate oxide, Materials Science Forum, 査読有, vol.778-780, 2014, pp.537-540.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.537

K. Ariyoshi, S. Harada, J. Senzaki, T. Kojima, K. Kozima, Y. Tanaka, T. Shinohe, Nitridation effects of gate oxide on channel properties of SiC trench MOSFETs, Materials Science Forum, 査読有, vol.778-780, 2014, pp.615-618.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.615

M. Okamoto, Y. Makifuchi, T. Araoka, M. Miyazato, Y. Sugahara, T. Tsutsumi, Y. Onishi, H. Kimura, S. Harada, K. Fukuda, A. Otsuki, H. Okumura, Improvement of channel mobility in 4H-SiC C-face MOSFETs by H<sub>2</sub> rich wet re-oxidation, Materials Science Forum, 査読有, vol.778-780, 2014, pp.975-978.  
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.975

T. Umeda, M. Okamoto, R. Kosugi, R. Arai, Y. Sato, S. Harada, T. Makino, T. Ohshima,

SiC MOS interface states: difference between Si face and C face, ECS Transactions, 査読有, vol.58, 2013, pp.55-60.  
DOI: 10.1149/05807.0055ecst

梅田享英, 岡本光央, 小杉亮治, 原田信介, 荒井亮, 佐藤嘉洋, 牧野高紘, 大島武, 奥村元, 4H-SiC MOS 界面の電子スピン共鳴分光評価、シリコンテクノロジー（応用物理学会分科会）査読無、161 巻、2013、pp.98-102.

〔学会発表〕(計 20 件)

梅田享英, 鹿児島陽平, 奥田貴史, 須田淳, 木本暢恒, 小杉亮治, 岡本光央, 原田信介, エピタキシャル基板を使用した 4H-SiC MOS 窒化界面の ESR 評価、第 63 回応用物理学春季学術講演会、2016 年 3 月 20 日、東京工業大学（東京都目黒区）  
梅田享英, 阿部裕太, Y.-W. Zhu, 岡本光央, 小杉亮治, 原田信介, 春山盛善, 小野田忍, 大島武, 4H-SiC MOSFET 中の単一表面欠陥の共焦点顕微鏡観察、第 63 回応用物理学春季学術講演会、2016 年 3 月 19 日、東京工業大学（東京都目黒区）  
Y. Kagoyama, M. Okamoto, S. Harada, R. Arai, T. Umeda, Microscopic difference between dry and wet oxidations of C-face 4H-SiC MOSFETs studied by electrically detected magnetic resonance, Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2015, Oct. 7, 2015, Giardini-Naxos (Italy).

T. Umeda, R. Arai, S.J. Ma, G.W. Kim, M. Okamoto, H. Yoshioka, S. Harada, T. Makino, T. Ohshima, Electrically detected magnetic resonance study on interface defects responsible for threshold-voltage shift in C-face 4H-SiC MOSFETs, Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2015, Oct. 5, 2015, Giardini-Naxos (Italy).  
T. Umeda, R. Arai, M. Okamoto, R. Kosugi, S. Harada, An interfacial defect complex (the P8/9 centers) in C-face 4H-SiC MOSFET studied by electrically detected magnetic resonance, Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2015, Oct. 5, 2015, Giardini-Naxos (Italy).

K. Murakami, S. Tanai, T. Okuda, J. Suda, T. Kimoto, T. Umeda, ESR study on hydrogen passivation of intrinsic defects in p-type and semi-insulating 4H-SiC, Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2015, Oct. 5, 2015, Giardini-Naxos (Italy).

鹿児島陽平, 岡本光央, 小杉亮治, 原田信介, 牧野高紘, 大島武, 梅田享英, 容量検出型電子スピン共鳴分光法による 4H-SiC MOSFET の結晶欠陥の測定、第 62 回応用物理学春季学術講演会、2015 年 3 月 13 日、東海大学（神奈川県平塚市）

G. W. Kim, S.J. Ma, R. Arai, M. Okamoto, S. Harada, T. Makino, T. Ohshima, T. Umeda, Electrically detected magnetic resonance (EDMR) study on interface defects in C-face 4H-SiC metal-oxide-semiconductor field effect transistors, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 13 日, 東海大学 (神奈川県平塚市)

棚井創基, 村上功樹, 奥田貴史, 須田淳, 木本恒暢, 小杉亮治, 大島武, 梅田享英, 4H-SiC 中の空孔欠陥と水素の反応と、水素複合欠陥の ESR 評価、第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 12 日, 東海大学 (神奈川県平塚市)

梅田享英, 4H-SiC 中の点欠陥はどこまで分かっているか? : パルク結晶と MOS 界面、第 2 回筑波大学パワーエレクトロニクス未来技術研究会, 2014 年 12 月 15 日, 筑波大学 (東京都文京区)

T. Umeda, Y. Sato, R. Kosugi, M. Okamoto, S. Harada, H. Okumura, Nitrogen doping to channel regions of 4H-SiC MOSFETs characterized by electron spin resonance, Euro. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2014, Sep. 24, 2014, Grenoble (France).

Y. Kagoyama, T. Umeda, M. Okamoto, R. Kosugi, S. Harada, T. Makino, T. Ohshima, Defects in 4H-SiC MOSFETs studied by capacitively detected magnetic resonance, Euro. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2014, Sep. 24, 2014, Grenoble (France).

梅田享英, 佐藤嘉洋, 佐久間由貴, 小杉亮治, 4H-SiC MOS 界面窒化処理における窒素ドーピングの ESR 定量、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 18 日, 北海道大学 (北海道)

梅田享英, シリコンカーバイド (4H-SiC) 中の格子欠陥の評価: 電子スピン共鳴 (ESR) 法と、第一原理計算の対応、第 24 回格子欠陥フォーラム, 2014 年 9 月 10 日, 恵那市 (愛知県)

岡本光央, 巻淵陽一, 荒岡幹, 宮里真樹, 須ヶ原紀之, 堤岳志, 大西泰彦, 木村浩, 原田信介, 福田憲司, 大月章弘, 奥村元, 水素リッチウェット再酸化によって作製された 4H-SiC(000-1)面上 MOSFET, SiC 及び関連半導体研究第 22 回講演会, 2013 年 12 月 10 日, さいたま市 (埼玉県)

T. Umeda, M. Okamoto, R. Kosugi, R. Arai, Y. Sato, S. Harada, T. Makino, T. Ohshima, SiC MOS interface states: difference between Si face and C face, The Electrochemical Society 224th Meeting, Oct. 28, 2013, San Francisco (USA).

T. Umeda, M. Okamoto, R. Arai, Y. Satoh, R. Kosugi, S. Harada, H. Okumura, T. Makino, T. Ohshima, C-face interface defects in 4H-SiC MOSFETs studied by electrically

detected magnetic resonance, Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2013, Oct. 4, 2013, Miyazaki (Japan).

M. Okamoto, Y. Makibuchi, M. Araoka, M. Miyazato, N. Sugahara, T. Tsutsumi, Y. Ohnishi, H. Kimura, S. Harada, K. Fukuda, A. Ohtsuki, H. Okumura, Improvement of channel mobility in 4H-SiC C-face MOSFETs by H<sub>2</sub> rich wet re-oxidation, Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2013, Sep. 30, 2013, Miyazaki (Japan).

荒井亮, 梅田享英, 佐藤嘉洋, 岡本光央, 原田信介, 小杉亮治, 奥村元, 牧野高紘, 大島武, 電流検出 ESR による C 面 4H-SiC MOSFET 界面欠陥からの水素脱離の観察, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 2013 年 9 月 19 日, 同志社大学 (京都府京田辺市)

梅田享英, 岡本光央, 小杉亮治, 荒井亮, 佐藤嘉洋, 原田信介, 奥村元, 牧野高紘, 大島武, 4H-SiC MOS 界面の電子スピン共鳴分光評価、電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会, 2013 年 6 月 18 日, 機械振興会館 (東京都港区)

〔図書〕(計 1 件)

梅田享英 他、薄膜の評価技術ハンドブック、テクノシステム, 2013, pp. 60-63、総ページ 624.

〔その他〕

ホームページ等

<http://esrlab.bk.tsukuba.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤ノ木 (梅田) 享英 (FUJINOKI, Takahide)  
筑波大学・数理物質系・准教授  
研究者番号: 10361354

### (2) 研究分担者

小杉 亮治 (KOSUGI, Ryouji)  
国立研究開発法人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・主任研究員  
研究者番号: 10356991

岡本 光央 (OKAMOTO, Mitsuo)  
国立研究開発法人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・主任研究員  
研究者番号: 60450665

原田 信介 (HARADA, Shinsuke)  
国立研究開発法人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・研究チーム長  
研究者番号: 20392649