

令和元年6月24日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04347

研究課題名(和文)窒化物半導体トランジスタの横方向破壊電界強度の向上に関する研究

研究課題名(英文)Study on lateral breakdown field in GaN-based transistors

研究代表者

葛原 正明 (Kuzuhara, Masaaki)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：20377469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：横型HEMTの破壊耐圧をそのドリフト領域の長さで除して求めた実効破壊電界の報告値が、せいぜい1MV/cm程度と小さく、理論予測値である3.3MV/cmに比べて著しく劣るという問題があった。本研究では、Fe添加濃度の異なる半絶縁性GaN基板上に横型HEMTを試作し、横型HEMTの実効破壊電界を制限している要因について検討した。その結果、HEMTの素子分離部に工夫を加え、さらにGaNバッファ層とGaN基板の絶縁特性に改良を加えることにより、高電界印加時のリーク電流を抑えることができ、横型HEMTにおいて2MV/cmを超える実効破壊電界を得るための道筋を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大きなバンドギャップをもつ半導体が将来のパワーデバイス材料として期待されており、シリコンカーバイド(SiC)、窒化ガリウム(GaN)などの材料が研究されている。パワーデバイス応用では、半導体の単位長さ当たりに印加可能な最大電圧である絶縁破壊電界が重要なパラメータであるが、GaNに関する限り、その報告例は少ない。特に横型HEMTに関して実験的に求められた実効破壊電界は、その理論予測値(3.3 MV/cm)に比べて1/3以下と小さいことが問題であった。本研究はこの原因の物理理解に学術的に取り組んだものであり、その成果は今後の社会実装におけるデバイス設計指針として役立つものである。

研究成果の概要(英文)：It was recognized that the reported values of the effective breakdown field, defined as the breakdown voltage divided by the effective drift region length of High-Electron-Mobility Transistors (HEMTs), were at best 1 MV/cm, which was far below the theoretically predicted value of 3.3 MV/cm. In this study, we have fabricated AlGaIn/GaN HEMTs on a free-standing semi-insulating GaN substrate with different Fe doping concentrations and investigated the physical origin restricting the measured maximum value of the effective breakdown field in HEMTs. As a result, we were able to suppress the unwanted leakage current under reverse-biased conditions by optimizing the isolation mesa-etching depth and by improving the insulating properties both in the GaN buffer and in the GaN substrate. Finally we demonstrated a valid method to achieve more than 2 MV/cm effective breakdown field in HEMTs same as that for the semi-insulating GaN substrate.

研究分野：化合物半導体デバイス

キーワード：窒化物半導体 HEMT 絶縁破壊 耐圧 リーク電流 半絶縁性基板 バッファ層 抵抗率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体デバイスの開発は横型 HEMT を中心に進められてきた。HEMT の耐圧はゲート電極とドレイン電極の間隔 (G-D 間距離) にほぼ比例して高くなることが知られており、オフ耐圧の最高値として既に 10kV 以上の優れた値が報告されていた。しかし、世界各所の研究機関で試作された横型 HEMT の破壊電圧をドリフト長である G-D 間距離の関数としてプロットすると、図 1 に示されるように、その直線の傾きで定義される実効破壊電界の値はせいぜい 0.6 ~ 1.0 MV/cm であり、縦型ダイオードで報告されている破壊電界 2 ~ 3 MV/cm に比べて著しく低いことが知られていた。この原因として、横型 HEMT では、横方向の高電界が印加される領域が、チャンネル真性部だけでなく、バッファ層と基板材料を含む周辺領域にも及んでいることが考えられた。すなわち、バッファ層や基板領域に低抵抗な領域が存在すると、その箇所でも異常なリーク電流が生じる結果となり、また、バッファ層や基板領域に結晶欠陥が含まれると、その部分で未熟な破壊現象が生じる結果となるなどの悪影響が想定された。しかし、バッファ層や基板領域への横方向電界の影響がデバイスの耐圧特性や GaN 材料の破壊電界強度に与える影響について詳しく調べられた報告例はなかった。

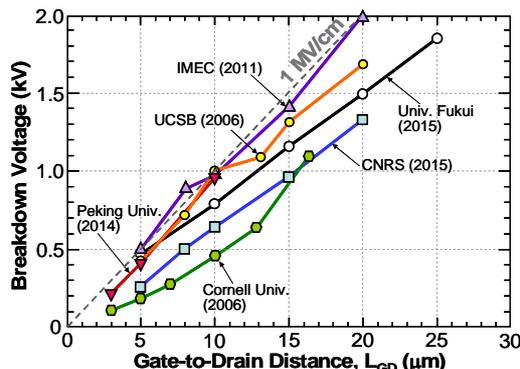


図 1 横型 HEMT の破壊耐圧の G-D 間距離依存性

2. 研究の目的

本研究では、自立 GaN 基板上に HEMT を試作しその特性向上を目指した。自立 GaN 基板を用いる最大の理由は、その優れた結晶性であり、結晶欠陥に起因する耐圧不良を抑制できる可能性が高いことである。また、バッファ層についても、GaN 基板を用いれば格子整合を心配することなく、結晶性と電気的特性のみに注力して成長された良好な GaN バッファ層を用いることができる。以上の着眼点に基づき、バッファ層と基板領域での異常な絶縁破壊現象を極力抑えて、横型 HEMT の実効破壊電界強度の向上を目指した。本研究の主目的は、横型 HEMT の実効破壊電界強度を決定する物理機構を学術的に理解することであるが、これを踏まえて性能上の達成目標として、実効破壊電界 2 MV/cm 以上の達成を掲げた。

3. 研究の方法

本研究では、半絶縁性 GaN 基板上に福井大学所有の標準プロセスを用いて HEMT を試作した。ゲート長は 3 μm とし、SiN 膜による表面パッシベーションを施した。GaN 基板の半絶縁性を向上させるため、HVPE 成長した GaN 基板のバンドギャップ内に深いアクセプタ準位を形成する Fe (鉄) を不純物として添加した。GaN バッファ層にも成長時に Fe を添加した。GaN 基板とバッファ層に添加した Fe 濃度をパラメータとして、GaN 基板上に試作した AlGaIn/GaN HEMT の絶縁破壊特性を評価した。GaN 基板については、その絶縁破壊特性だけでなく、抵抗率やその温度依存性についても検討した。HEMT 試作では、素子分離に用いるメサエッチング深さの効果についても詳細に検討し、バッファ層と GaN 基板の電気的特性が HEMT の破壊特性に与える影響を独立に評価できるように配慮した。

4. 研究成果

(1) 半絶縁性 GaN 基板の抵抗率

半絶縁性 GaN 基板の高抵抗化を図るため、Fe 添加濃度の異なる 2 種類の GaN 基板 (基板 A, 基板 B) を準備した。成長には HVPE 法を用いた。SIMS 測定から求めた Fe 添加濃度は、基板 A で $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、基板 B で $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ であった。いずれの基板の厚さも 320 μm である。両基板上に光リソグラフィを用いてプレーナ素子を作製した。各基板には、表面を塩酸 (HCl) で前処理した後に Ti/Al/Mo/Au からなるオーミック電極を形成した。なお、熱処理が GaN 基板の抵抗率を変化させる可能性を懸念し、オーミック電極の熱処理は原則行わないこととした。

まず、基板の抵抗率を測定するため、一辺 2 mm の正方形に切り出した基板の表面と裏面にオーミック電極を形成した試料の電流電圧特性を測定した。結果を図 2 に示す。直線部分から求めた抵抗率は、基板 A が $3 \times 10^9 \text{ } \Omega\text{cm}$ 、基板 B が $4 \times 10^{10} \text{ } \Omega\text{cm}$ であった。Fe 添加量の増加に対応して抵抗率の増加が確認された。基板 A については、基板表面に形成した電極間隔 20 μm のプレーナ抵抗素子を用いて同様に抵抗率を測定したところ、室温で $5 \times 10^9 \text{ } \Omega\text{cm}$ と求められた。

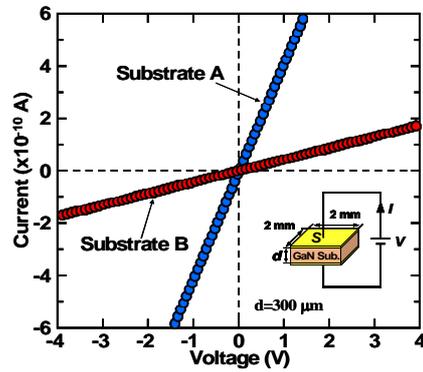


図2 半絶縁性 GaN 基板の厚さ方向の電流電圧特性

図3にプレーナ抵抗素子について抵抗率の温度依存性を測定した結果を示す。抵抗率の対数値と温度の逆数(1/T)の間に直線関係が得られ、その傾きから活性化エネルギー0.60eVが得られた。この活性化エネルギーはGaNにおいて報告されているFeのエネルギー準位(E_c-E_t)と良い一致を示す。なお、プレーナ素子については750, 800, 850°Cの各温度でオーミック電極の熱処理を行った結果も示したが、オーミック熱処理の有無による基板抵抗率とその温度依存性に有意な違いは認められなかった。

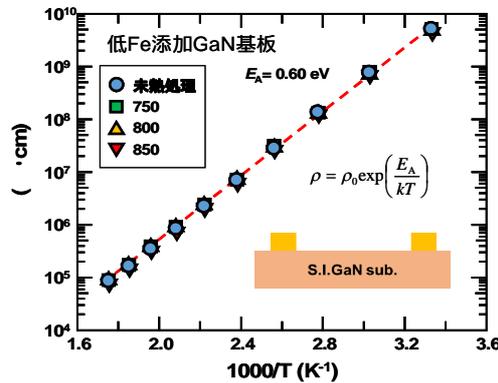


図3 基板Aの抵抗率の温度依存性

(2)半絶縁性 GaN 基板の絶縁破壊電界

電極間隔を2 μm から 30 μm まで変化させたプレーナ抵抗素子を用いて、その破壊耐圧を測定した。基板Bについては、表面から厚さ500 nmの表面層をエッチング除去した基板も用意し、基板Cとした。3種類の半絶縁性 GaN 基板について破壊耐圧の電極間距離依存性の測定結果を図4に示す。いずれの基板についても耐圧と電極間隔にはきれいな直線関係が得られ、

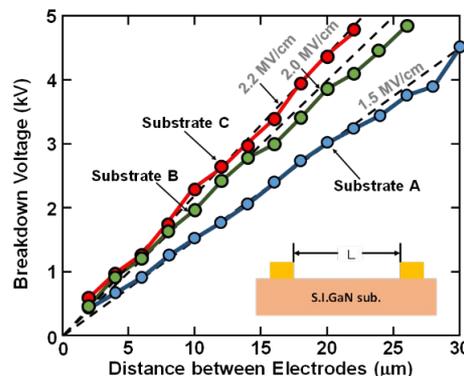


図4 半絶縁性 GaN 基板の破壊耐圧の電極間隔依存性

直線の傾きから求めた破壊電界強度は基板A, B, Cの順に、1.5 MV/cm、2.0 MV/cm、2.2 MV/cmとなった。基板Cの破壊電界が基板Bより僅かに高い値を示したが、この原因を調べるため、基板BについてSIMS深さ方向分析を行った。図5に分析結果を示す。基板Bでは、表面から深さ約400 nmに亘ってFe濃度が連続的に約1桁減少する表面遷移層が存在することが分かった。この表面遷移層では抵抗率が他の領域より低くなった可能性が考えられ、この表面遷移層をエッチング除去した基板Cでは、高濃度Fe添加による高抵抗率を反映してより高い実効破

壊電界が得られたものと考えられる。

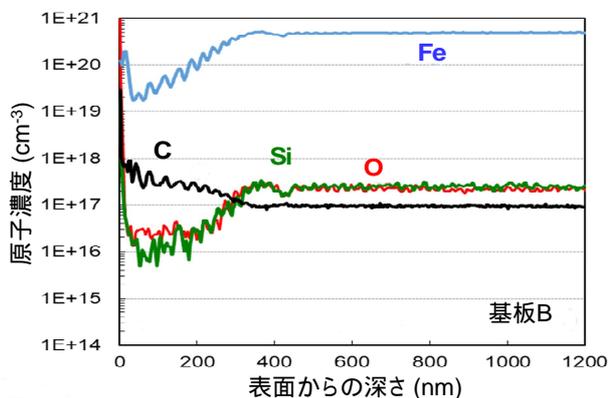


図5 基板BのSIMS深さ方向分析結果

(3) 半絶縁性 GaN 基板上に試作した HEMT の絶縁破壊電界

実効破壊電界 1.5 MV/cm が得られた基板 A については、850°Cの熱処理後も安定した電気的特性が示されたため、基板上に MOCVD 法を用いて AlGaIn/GaN ヘテロ接合を成長した。成長層は下から順に、Fe 添加 GaN バッファ層 (300 nm)、GaN チャネル層 (900 nm)、AlGaIn 障壁層 (25 nm) である。このエピ層を用いて、ゲート長が 3 μm で G-D 間距離を 2 μm から 30 μm まで変化させた HEMT を試作した。図 6 に試作した HEMT のオフ耐圧の G-D 間距離依存性を示す。直線関係の傾きから、HEMT の破壊電界は 1.1 MV/cm と求められ、この値が基板 A の破壊電界 (1.5 MV/cm) より明らかに小さいことが分かった。

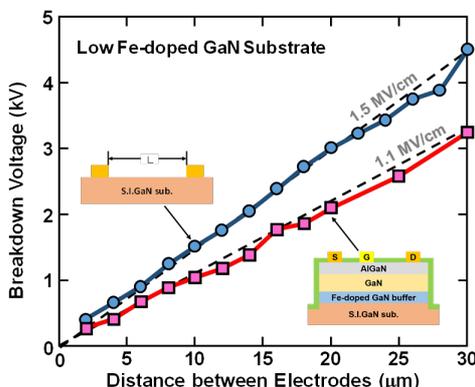


図6 基板A上に試作したHEMTの破壊電圧のG-D間距離依存性

試作した HEMT の破壊電界が、用いた基板 A の破壊電界より劣る主要因を調べるため、反応性ドライエッチング (ICP-RIE) を用いて、HEMT エピ層を表面から約 1000 nm だけ除去し、GaN バッファ層を表面に露出させた後、その上にオーミック電極を蒸着してプレーナ抵抗素子を作製した。興味深いことに、このバッファ層上の抵抗素子の破壊電界は HEMT と同じ 1.1 MV/cm であった。この結果から、基板 A 上に試作した HEMT の破壊電界は、Fe 添加 GaN バッファ層の破壊電界によって支配されていることが分かった。

HEMT 破壊電界決定の原因をさらに詳細に調べるため、破壊電界が 1.3 MV/cm である半絶縁性 GaN 基板に、GaN バッファ層を成長せず、直接 AlGaIn を 30 nm 厚で成長させた特別なエピ基板を準備し、そのエピ基板に通常プロセスを用いて HEMT を試作した。GaN 基板に直接 AlGaIn 薄膜を堆積する結晶成長条件については、その最適化がまだ十分とは言えず、得られた二次元電子ガスの移動度の最高値は 300 cm²/Vs 程度に留まった。しかしこのエピ基板に試作した HEMT は、図 7 に示すように、しきい値電圧 2 V で、最大ドレイン電流 170 mA/mm を示し、ドレイン電流のオン/オフ比も 10⁴ 以上と比較的良好な特性を示した。この結果は、Fe 添加半絶縁性 GaN 基板の表面部をチャネル層に用いた HEMT の世界初の実証であり、自立 GaN 基板を用いた HEMT 構造の新たな可能性を示した結果としても特筆に値する。この直接成長 AlGaIn をもつ HEMT についても、オフ耐圧の G-D 間距離依存性を測定した。結果を図 8 に示す。破壊耐圧は G-D 間距離 30 μm までほぼ直線的に増加し、その傾きから実効破壊電界 1.3 MV/cm が得られた。この値は用いた半絶縁性 GaN 基板の破壊電界に一致しており、HEMT の破壊電界が半絶縁性基板の破壊電界によって決定されることが明らかとなった。

以上の結果から、今後さらに高い絶縁破壊電界 (>2.2 MV/cm) をもつ半絶縁性 GaN 基板が

開発されれば、同様に高い実効破壊電界をもつ横型 HEMT の試作が可能となり、さらなる小型で高耐圧な HEMT パワーデバイスの開発が推進されるものと思われる。

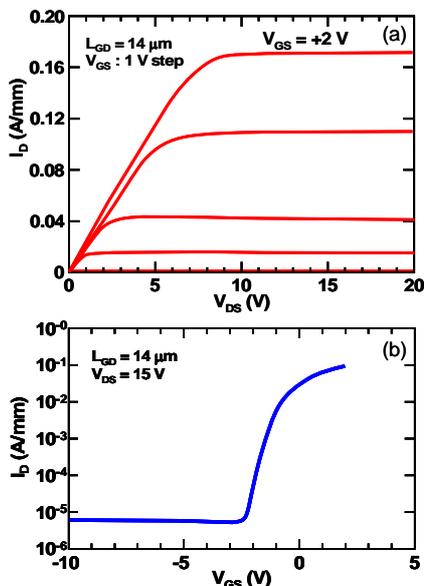


図7 直接成長 AlGaN HEMT の直流特性

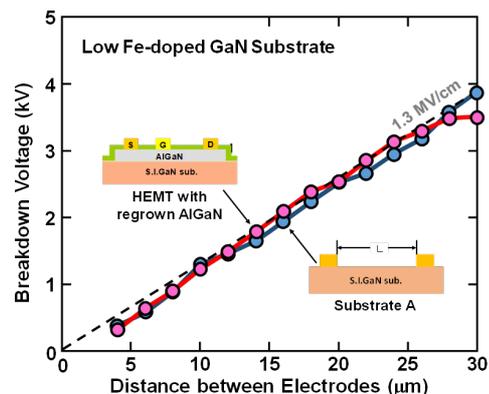


図8 直接成長 AlGaN HEMT の破壊耐圧の G-D 間距離依存性

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- [1] A. Yamamoto, S. Makino, K. Kanatani, and M. Kuzuhara, “AlGaN/GaN heterostructures with an AlGaN layer grown directly on reactive-ion-etched GaN showing a high electron mobility ($>1300 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)”, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 045502 (2018).
- [2] A. Yamamoto, K. Kanatani, S. Makino, and M. Kuzuhara, “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of AlGaN directly on reactive-ion etching-treated GaN surfaces to prepare AlGaN/GaN heterostructure with high electron mobility ($\sim 1500 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$): Impacts of reactive-ion etching-damaged layer removal”, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 125501 (2018).
- [3] H. Tokuda, K. Suzuki, J. T. Asubar, and M. Kuzuhara, “Electron concentration in highly resistive GaN substrates co-doped with Si, C, and Fe,” Jpn. J. Appl. Phys. 57, 071001 (2018).
- [4] A. Yamamoto, S. Makino, K. Kanatani, and M. Kuzuhara, “AlGaN/GaN heterostructures with an AlGaN layer grown directly on reactive-ion-etched GaN showing a high electron mobility ($>1300 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)”, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 045502 (2018).
- [5] M. Kuzuhara, J. T. Asubar, and H. Tokuda, “AlGaN/GaN high-electron-mobility transistor technology for high-voltage and low-on-resistance operation (invited review)”, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 070101 (2016).

[学会発表] (計 13 件)

- [1] A. Aoai, K. Suzuki, J. T. Asubar, H. Tokuda, N. Okada, K. Tadatomo, and M. Kuzuhara, “Study on breakdown field in Fe-doped semi-insulating GaN substrates,” IWN-2018, ThP-ED-2, Kanazawa, Nov. 15, 2018.
- [2] A. Yamamoto, K. Kanatani, and M. Kuzuhara, “AlGaN/GaN HEMTs fabricated using AlGaN regrowth on RIE-GaN surfaces,” IWN-2018, ED-5-6, Kanazawa, Nov. 13, 2018.
- [3] A. Aoai, K. Suzuki, J. T. Asubar, H. Tokuda, M. Kuzuhara, K. Nojima, N. Ishibashi, N. Okada, and K. Tadatomo, “Characterization of resistivity and breakdown field in Fe-doped semi-insulating GaN substrates,” IMFEDK2018, Kyoto, Jun.22, pp.72-73, 2018.
- [4] K. Suzuki, A. Aoai, J. T. Asubar, H. Tokuda, K. Nojima, N. Ishibashi, N. Okada, K. Tadatomo, and M. Kuzuhara, “Characterization of resistivity and breakdown field in Fe-doped semi-insulating GaN substrates,” Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE2018), Bucharest, Romania, May 14, 2018.
- [5] M. Kuzuhara, “GaN-based HEMTs for high-voltage operation,” Int’l. Conf. on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS), 01-Nitride-1, Nagoya, Oct.1, 2017.
- [6] M. Kuzuhara, “Advanced breakdown characteristics of AlGaN/GaN HEMTs fabricated on free-standing GaN substrates,” 8th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS2017), Qingdao, China, Sept.26, 2017.

- [7] A. Yamamoto, K. Kanatani, S. Makino, and M. Kuzuhara, "MOVPE Growth Behavior of AlGaIn/GaN Heterostructures with AlGaIn Directly on RIE-GaN showing a High Electron Mobility ($>1300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)," SSDM 2017, Sendai, N-4-04, Sept. 21, 2017.
- [8] M. Kuzuhara, "GaIn HEMTs on highly resistive GaIn substrates," 12nd Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM-12), Kagoshima, Japan, Aug.29, 2017.
- [9] A. Yamamoto, S. Yoshida, K. Kanatani, and M. Kuzuhara, "A high electron mobility ($\geq 1300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) in AlGaIn/GaN heterostructures prepared by direct AlGaIn regrowth on reactive-ion-etched GaIn surface without regrown GaIn interlayers," ICNS2017, Strasbourg, France, July 27, 2017.
- [10] K. Kanatani, S. Yoshida, A. Yamamoto, and M. Kuzuhara, "Characterization of AlGaIn/GaN HEMTs with directly regrown AlGaIn barrier layer," IMFEDK2017, B-6, Kyoto, June 30, pp.94-95, 2017.
- [11] M. Kuzuhara, J. T. Asubar, and H. Tokuda, "High breakdown voltage AlGaIn/GaN HEMTs fabricated on semi-insulating GaIn substrates," Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices, Mallorca, Spain, Mar.6, p.2, 2017.
- [12] M. Kuzuhara, J. T. Asubar, and H. Tokuda, "Effect of Passivation on breakdown voltage and dynamic on-resistance in AlGaIn/GaN HEMTs," E-MRS, Dig., p.149, Warsaw, Poland, Sept, 2016.
- [13] J. H. Ng, J. T. Asubar, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "AlGaIn/GaN HEMTs on Free-standing GaIn substrate with Breakdown Voltage of 5 kV and Effective Lateral Critical Field of 1 MV/cm", International Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS-MANTECH2016), Miami, USA, May, 2016.

〔その他〕

ホームページ等 <http://kuzuharalab.fuee.u-fukui.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：アスバル ジョエル

ローマ字氏名：Joel T. Asubar

所属研究機関名：福井大学

部局名：テニユアトラック推進本部

職名：講師

研究者番号(8桁)：10574220

研究分担者氏名：山本 あき勇

ローマ字氏名：Akio Yamamoto

所属研究機関名：福井大学

部局名：学術研究院工学系部門

職名：特命教授

研究者番号(8桁)：90210517

研究分担者氏名：只友 一行

ローマ字氏名：Kazuyuki Tadatomo

所属研究機関名：山口大学

部局名：大学院創成科学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：10379927