

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04227

研究課題名（和文）(111)B上MnAs/III-V系ヘテロ構造における界面構造と面内スピン伝播

研究課題名（英文）Interface structure and in-plane spin transport in MnAs/III-V-based heterostructures on (111)B

研究代表者

赤堀 誠志（Akabori, Masashi）

北陸先端科学技術大学院大学・ナノマテリアルテクノロジーセンター・准教授

研究者番号：50345667

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：大きなスピン軌道結合を有する半導体チャネルと強磁性体金属電極との複合構造からなるスピン電界効果トランジスタの実現を目指して、研究代表者らはGaAs(111)B上MnAs/InAs系ヘテロ構造を利用したスピバルブ素子に関する研究を進めている。本研究では、まず、局所・非局所スピバルブ素子における測定温度上昇による信号強度および注入効率の増大を見出した。また、電子線回折や電子顕微鏡の観察から、ヘテロ界面近傍の格子緩和について知見を得た。その他、縦方向の電気伝導特性からトンネル効果や窒素ガスイオンビーム加工による金属の直接微細加工に関する成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、将来の量子情報処理などを担う可能性がある、半導体をベースとしたスピンデバイスの実現に寄与するものである。本研究はナノテクノロジーをベースとしており、半導体InAs・GaAsと強磁性体MnAsを組み合わせた新構造の開発および構造評価や、新構造をもとにしたスピンデバイス開発および特性評価と多岐に渡っており、マテリアルサイエンス、ナノテクノロジー、スピントロニクス発展にも貢献している。

研究成果の概要（英文）：We have studied MnAs/InAs heterostructures on GaAs(111)B for spin field-effect transistors based on hybrid structures consisting of semiconductor channel with large spin-orbit coupling and ferromagnetic metal electrodes. In the present study, we first found the enhancement of spin signals and injection efficiency in local and non-local spin valve devices by increasing measurement temperatures. Then we obtained the information of lattice relaxation around heterointerfaces by RHEED and STEM. Also we confirmed tunneling effect in vertical transport, and metal direct patterning by N2 GFIS-FIB.

研究分野：半導体ナノスピントロニクス

キーワード：スピン軌道結合 MnAs/InAs スピバルブ素子 界面構造 面内スピン伝播

1. 研究開始当初の背景

チャージではなくスピンを情報媒体とするスピndeバイスは、2016年の国際デバイスおよびシステムロードマップ(IRDS)中 Beyond CMOS 白書でも、重要デバイスの一つとして位置付けられている。半導体を基礎とした代表的なスピndeバイスは、大きな Rashba スピン軌道結合を有する半導体チャネルと強磁性体金属(FM)電極との複合構造からなる図 1a のようなスピndeバイス効果トランジスタ(スピnde FET)である。スピnde FET は図 1b のような振動特性を示すと期待され、高機能・省消費電力が実現されるものと考えられている他、スピnde偏極電子を量子ビットとする量子コンピューティング基本素子としての期待もある。一方で、スピnde FET の動作に関しては、いくつかの報告があるが[H. C. Koo et al.: Science 325(2009)1515 など]、懐疑的な点も多く、提案から 4 半世紀経つものの実現に至っていないと考えるのが妥当である。スピnde FET の実現が難しい理由として、良好な FM/半導体接合の形成が難しい点、半導体チャネル中でのスピnde緩和抑制が難しい点が挙げられる。前者のうち「良好な」という意味は、FM/半導体接合でスピndeが効率良く伝播するということであり、界面でのスピnde散乱抑制や逆スピnde流抑制が必要で、すなわち FM/半導体界面形成法が重要となる。また後者については、伝導キャリアの軌道が制限できる細線チャネル形成がスピnde緩和抑制法の一つと期待されている。

このような背景の下、研究代表者らは、III-V 半導体用分子線エピタキシャル(MBE)装置で形成可能な室温強磁性体金属である六方晶 MnAs[M. Tanaka et al.: APL65(1994)1964]に着目し、これをスピnde軌道結合の大きな III-V 半導体である InAs と in-situ で複合化した図 1c のような GaAs(111)B 上の MnAs/III-V 系ヘテロ構造について、科研費・基盤 C や村田学術振興財団の助成を受けて研究を進めてきた。これは、MBE の一つの特徴である急峻な界面形成によってスピnde散乱の抑制を狙うものである。加えて、InAs は表面電子蓄積層を有することが知られており[M. Noguchi et al.: PRL66(1991)2243]、ヘテロ構造やドーピングをとまわずに半導体チャネルが得られるという利点も有する。さらに、基板として GaAs(111)B を用いることにより、MnAs の c 軸が基板面直になる事を期待している[Y. Morishita et al.: JJAP36(1997)L1100]。これまでに MnAs/InAs ヘテロ構造作製と評価[Md. E. Islam and M. Akabori: JCG463(2017)86]および幅 20 μm の幅広チャネルを有する非局所スピndeバルブ素子の作製ならびにスピnde信号の検出[Md. E. Islam and M. Akabori: PHYSB532(2018)95]、薄いトンネル障壁として GaAs を界面に挿入した MnAs/GaAs/InAs ヘテロ構造による局所・非局所スピndeバルブ素子の作製ならびに評価[Md. E. Islam et al.: 6th EM-NANO(2017)PA4-2-2]を進めてきた。研究代表者らが従来行っていた、スパッタ成膜 FM と MBE 成長 In(Ga)As 2 次元電子ガス(2DEG)との組み合わせによるスピndeバルブ素子[S. Hidaka et al.: APEX5(2012)113001 など]と比べると、注入効率に関しての優位性が示されている。しかしながら、スピnde信号強度としては MnAs のスピnde偏極率に到達しておらず、「MnAs/III-V 系ヘテロ構造において、どのような構造・素子にすればよりスピnde信号強度が増大するか」が、本研究課題の核心をなす「問い」であった。

2. 研究の目的

上記の「問い」に答えるべく本研究では、図 2 に示すように、MnAs/III-V 系ヘテロ構造による局所・非局所同時測定可能なスピndeバルブ素子の作製・評価とともに、未だ十分にできていない MnAs/III-V 系ヘテロ界面の原子レベルでの構造評価を進め、それらを比較検討することにより、界面構造と面内スピnde伝播との相関を明らかにすることを目的とした。より具体的には、素子作製・評価においては、チャネルの細線化や金属/絶縁体/半導体(MIS)ゲート形成を進めて寸法やゲート電界に対する系統的な評価を行うことを目指した。また、構造評価においては、MBE 成長条件や層構造・基板に対する界面構造とともに表面形状・結晶構造・磁気特性・電気特性の系統的な評価を行うことを目指した。

本研究は、(a)MnAs の c 軸が面直になる(111)B 上に、(b)スピnde軌道結合の強い InAs をチャネル材料とし、(c)細線化チャネルと MIS ゲートを有するスピndeバルブ素子の局所・非局所同時測定を行う、という 3 点の大きな特徴を有しており、リバイバル的だが、他ではこれまでに行われていない独自性の高い研究である。III-V 半導体を用いたスピndeバルブ素子に関する研究は、ほとんどが(001)上で行われており、結晶学的に異なる(111)B 上で行うことでスピnde伝播に関する新たな知見を得ることが可能である。特に結晶方位依存の Dresselhaus スピnde軌道結合が(001)上とは異なると予想され、さらに MIS ゲートと組み合わせることにより電界誘起の Rashba スピnde軌道結合との共存についても調べる事が可能と考えられ、半導体スピndeトロン

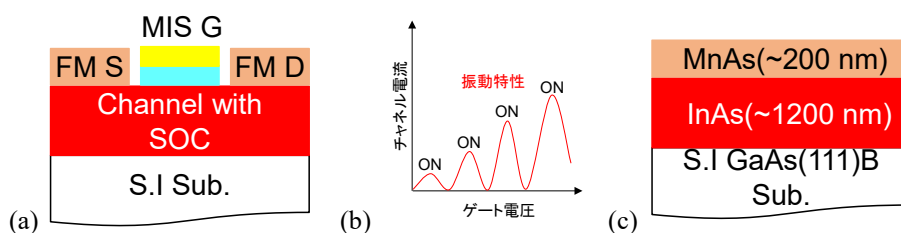


図 1 (a)スピnde FET の概念図 (b)スピnde FET の特性 (c)MnAs/InAs/GaAs(111)B ヘテロ構造

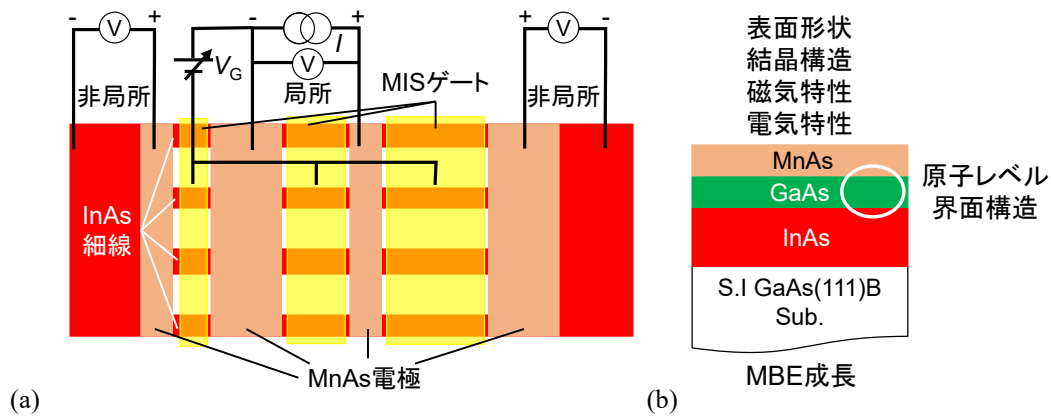


図2 (a)作製・評価するスピバルブ素子と測定回路 (b) MnAs/III-V 系 ヘテロ構造

クスにおいて重要である[M. Akabori et al.: PRB77(2008)205320 など]。また細線化チャンネルと MIS ゲートを有するスピバルブ素子の局所測定は、FM の磁化方向が異なる以外はスピ FET 実現に必要な要素技術を全て含んでいる。以上より、本研究はスピ FET を実現することに直接繋がる創造性の高い研究と考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究では、これまで作製してきた GaAs(111)B 上の MnAs/InAs および MnAs/GaAs/InAs ヘテロ構造を、成長条件を変えながら MBE 成長し、格子緩和の様子を反射高速電子線回折(RHEED) による評価を試み、さらに断面を走査透過電子顕微鏡(STEM) により原子レベルで構造評価を試みた。また、従来同様の幅広チャンネルのスピバルブ素子を作製し、超伝導マグネットとロックインアンプなどを組み合わせた計測システムにより同時測定による局所・非局所スピバルブ特性評価も進めた。また、計画にはなかったが、縦型素子も試作し、原子間力顕微鏡(AFM)による電気伝導特性の評価も行った。加えて、成長したヘテロ構造を用いて、細線化チャンネルと MIS ゲートの加工・形成法および条件の検討のうち、電界電離ガスイオンビーム(GFIS-FIB)によるエッチングについて、金属材料を用いて検討した。

### 4. 研究成果

研究開始後長らく、MBE 装置に不具合が生じており、また本研究に協力する大学院生の確保も難しかったため、計画通りの進捗は得られなかった。しかしながら、研究期間中に以下のようにいくつかの成果を得ることができた。

(1) 局所・非局所スピバルブ素子におけるスピバルブ信号の温度依存性 [Md. E. Islam et al.: AIP Advances 9 (2019) 115215 に掲載]

まず、従来構造・デザインの局所・非局所スピバルブ素子について、1.5K、77K、室温の局所・非局所信号の比較を試みた。その結果、局所信号については室温まで、図3に示す非局所信号については77Kまで、温度が上がるに従い信号強度および注入効率の増大が見られた。このような振る舞いについて、半導体と強磁性体のインピー

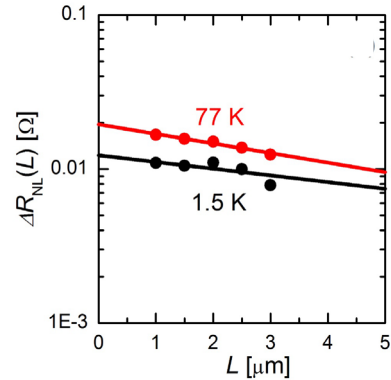


図3 非局所信号の距離依存性

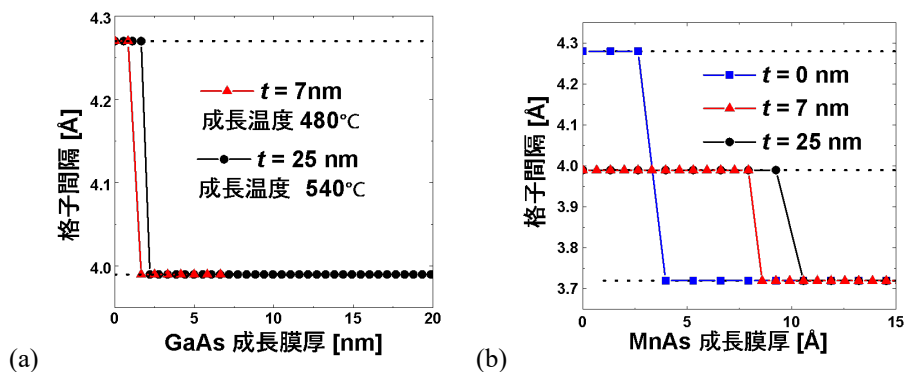


図4 (a)GaAs 挿入層/InAs 界面近傍 (b) MnAs/III-V 界面近傍の格子間隔



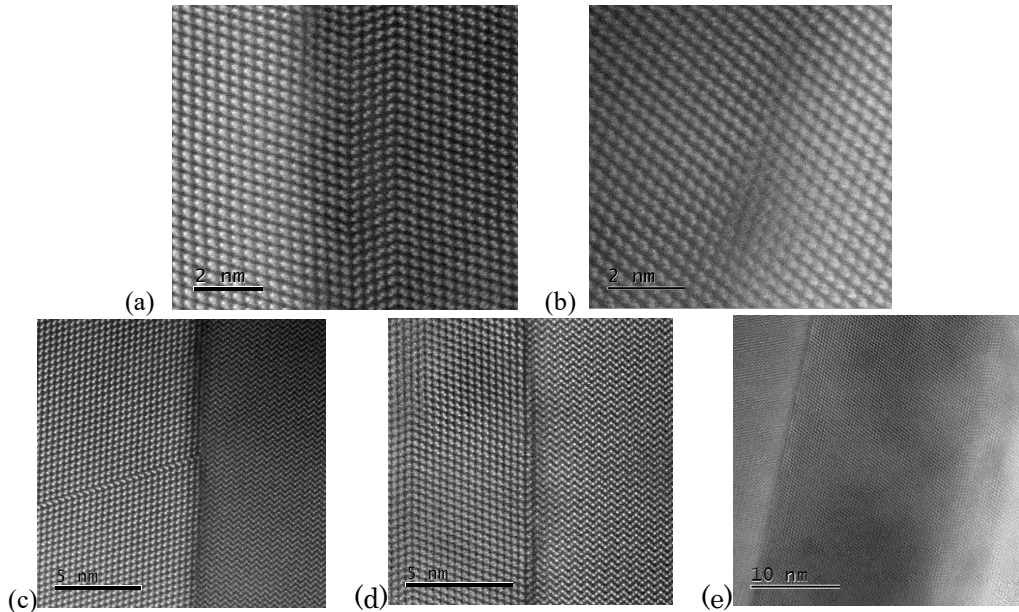


図 5 (a) GaAs 挿入層(7nm、写真右側)/InAs 界面近傍 (b) GaAs 挿入層(25nm、写真左側)/InAs 界面近傍 (c) MnAs(写真右側)/InAs 界面近傍 (d) MnAs(写真右側)/GaAs 挿入層(7nm)界面近傍 (e) MnAs(写真左側)/GaAs 挿入層(25nm) 界面近傍の STEM 像

ダンス整合の点に着目した。構造中の InAs の導電率が温度変化をほとんど示さないのに対して、MnAs の導電率は温度上昇に伴い減少することを示し、温度上昇に伴ってインピーダンス整合の状態が向上することにより、注入効率が增大することを定性的に明らかにした。これは、また以前に別の層構造・デザインのスピンバルブ素子で得られていた室温での結果と矛盾せず、MnAs を利用する優位性が示された。

(2) ヘテロ界面近傍の格子緩和 [W. Kanetsuka et al.: 8th EM-NANO (2021) P1-32 にて発表]

各ヘテロ界面における格子緩和の様子に着目し、評価を行った。まず、RHEED によって評価した結果を図 4 に示す。図中  $t$  は GaAs 挿入層の厚さを示している。GaAs 挿入層については 2nm 程度、MnAs については 1nm 以下で格子緩和が急峻に起こっているように見えた。続いて、断面 STEM を評価した結果を図 5 に示す。GaAs 挿入層/InAs 界面でミスフィット転位が発生していること、GaAs 挿入層には界面から 1nm 程度離れた後に部分的に双晶が入っていること、MnAs/III-V 界面でもミスフィット転位および積層欠陥が発生していること、MnAs は界面を除くと乱れなく成長していることが明らかとなった。また格子緩和は界面で起きており、成長中の RHEED とは若干異なる結果となった。これは、成長後に成長温度から室温に戻る過程で、転位線が動いていると解釈すれば不自然ではない。以上の結果を勘案すると、現状の成長条件下では格子不整に伴うミスフィット転位を避けることは不可能だが、1nm 程度の GaAs 挿入層であれば双晶を避けることは可能とまとめることができ、今後は 1nm 以下の GaAs 挿入層を中心に試料および素子作製を行うことを目指す。

(3) 縦型素子の試作と電気伝導評価

MnAs/GaAs/InAs/GaAs(111)B 構造における縦方向の電気伝導評価を行うため、円形マスクを用いてマスク周囲を InAs 層の途中までエッチングすることで、縦型素子を試作した。電気伝導評価には AFM を使い、基板側コンタクトを InAs に取り、円形マスクした近傍を導電性 AFM プローブでスキャンした。こうすることで、InAs 上では InAs 内の横型伝導を、MnAs 上では GaAs 挿入層を介した縦型伝導を見ることができる。図 6a に AFM 像、b に MnAs 上での電流電圧特性を示す。GaAs 挿入層の厚さは 3nm で

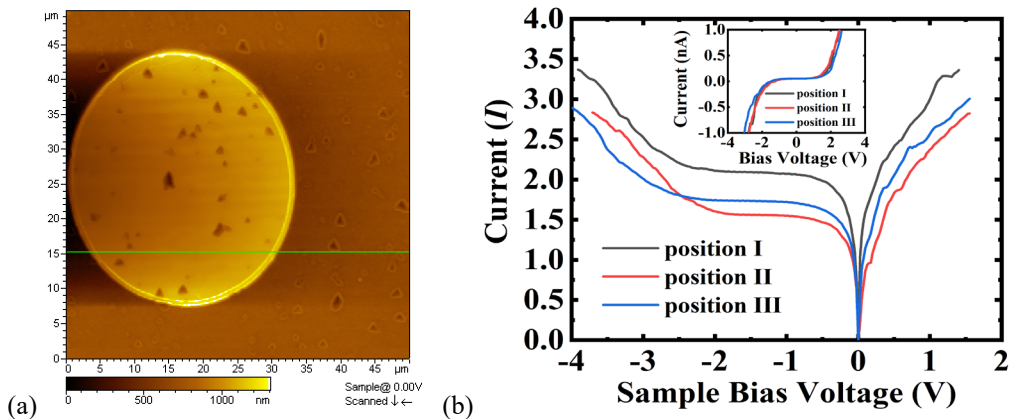


図 6 (a) AFM 像 (b) MnAs 上での電流電圧特性

ある。MnAs 上では非対称な非線形特性を示し、GaAs 挿入層がトンネル障壁として機能していることを示唆している。ただし、電流レベルはかなり低く、3nm はかなり厚いと思われる。なお、InAs 上では予想通りにオーミック性を示した。

(4) GFIS-FIB の Nb エッチング [S. Sudo et al.: 8th EM-NANO (2021) B1-2-2 にて発表]

MnAs/GaAs/InAs/GaAs(111)B 構造の準備が遅れていたため、GFIS-FIB によるエッチング加工検討について、比較的硬い金属で超伝導を示す Nb を用いて試験した。詳細条件を検討し、図 7a に示すような加工幅が約 20nm、見込み深さが約 100nm の加工をすることが可能になり、さらに極低温における電気伝導を評価したところ、図 7b に示すようなジョセフソン接合と考えられる電流電圧特性が得られた。

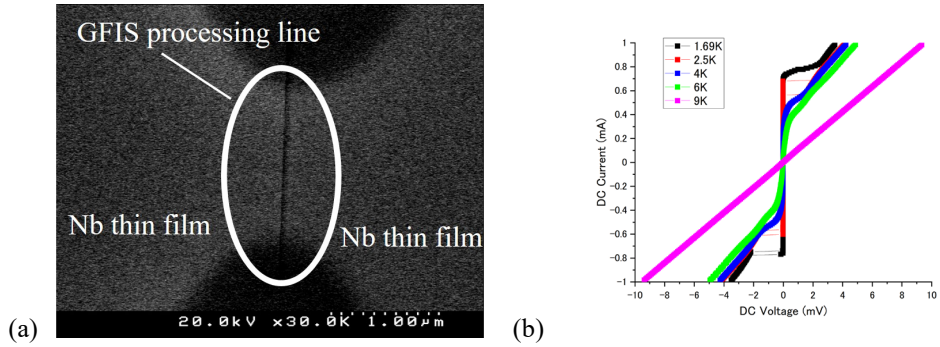


図 7 (a) Nb の GFIS-FIB 加工 (b) 加工した Nb の電流電圧特性の温度依存性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Islam Md. Earul, Hayashida Kazuki, Akabori Masashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Spin injection and detection in MnAs/GaAs/InAs hybrid system on GaAs(111)B through lateral non-local spin valve measurement at varied temperature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115215 ~ 115215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5126242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Helman C., Camjayi A., Islam E., Akabori M., Thevenard L., Gourdon C., Tortarolo M.	4. 巻 103
2. 論文標題 Anomalous Hall effect in MnAs: Intrinsic contribution due to Berry curvature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134408-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.134408	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 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masashi Akabori, Md. Earul Islam, Dat Quoc Tran
2. 発表標題 MATERIALS STUDY FOR SPIN FIELD EFFECT TRANSISTORS USING MOLECULAR BEAM EPITAXY
3. 学会等名 11th Scientific Conference of University of Science, Viet Nam National University Ho Chi Minh City (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinya Sudo, Masashi Akabori, Munenori Uno
2. 発表標題 Fabrication of Josephson junctions by single line etching of Nb thin films utilizing nitrogen gas field ion source focused ion beam
3. 学会等名 The Eighth International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wataru Kanetsuka, Masashi Akabori, Tongmin Chen, Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Lattice relaxation around heterointerfaces in MnAs/GaAs/InAs/GaAs(111)B grown by molecular beam epitaxy
3. 学会等名 The Eighth International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金塚渉、赤堀誠志、陳桐民、大島義文
2. 発表標題 分子線エピタキシーにより成長したMnAs/GaAs/InAs/GaAs(111)B/ハイブリッド構造における界面周辺での格子緩和
3. 学会等名 令和二年度 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関