

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04173

研究課題名（和文）縦型スピンドバイスに向けた(111)B上MnAs/III-V/MnAsヘテロ構造

研究課題名（英文）MnAs/III-V/MnAs heterostructures on (111)B for vertical spin devices

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はMnAs/III-V/MnAsヘテロ構造の結晶成長とその縦型スピンドバイス応用を目指したものである。低温でMnAs/InAs/MnAsヘテロ構造を分子線エピタキシャル成長し、さらに縦型スピンドバイス素子の作製と評価を行った。その結果、異なるサイズの複数素子で明瞭なスピンドバイス信号が観測され、そのピーク位置はサイズによらないことが示された。さらに磁化曲線との比較により、狙い通りに表面側と基板側のMnAsの保磁力差によってスピンドバイスが実現できていることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、MnAsとInAsとの組み合わせによる半導体スピントロニクスにおいて、従来の横型素子だけでなく縦型素子での動作を示したものである。また、狙い通りではあるが、デバイスのサイズではなく、基板側と表面側のMnAs保磁力差によるスピンドバイス動作を明らかにしており、新たな知見を与えるものである。今後さらに研究を進めることで、スピンドバイスの詳細や効率改善のメカニズムが明らかになると期待され、この材料系でのスピントロニクスの可能性が広がるものと思われる。

研究成果の概要（英文）：This research focuses on MnAs/III-V/MnAs heterostructure growth and spin device application. We performed low-temperature growth of MnAs/InAs/MnAs heterostructures by molecular beam epitaxy, and then we performed fabrication and characterization of vertical type spin valve devices using the heterostructures. As a result, we clearly observed spin valve signals in various sizes of devices, and confirmed the spin valve peak field is independent of the device size. Moreover, with comparison to magnetization property of the heterostructure, we clarified that the spin valve behavior is realized by the difference of coercive fields between top and bottom MnAs layers that is our concept.

研究分野：半導体スピントロニクス

キーワード：縦型スピンドバイスデバイス MnAs InAs 分子線エピタキシー

1. 研究開始当初の背景

2020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 カテゴリーにおいては、チャージではなくスピンを情報媒体とするスピンドバイスが重要デバイスの一つとして位置付けられている。大きなスピン軌道結合(SOC)を有する半導体チャネル(CH)と強磁性体金属ソース・ドレイン電極(FM S/D)との複合構造からなる図 1(a)のようなスピン電界効果トランジスタ(スピンFET)は代表的な半導体スピンドバイスである。スピン FET は図 1(b)のような振動特性により高機能・省消費電力が実現されるものと考えられている他、スピン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、スピン FET の動作報告 [H. C. Koo et al.: Science 325(2009)1515 など]には懐疑的な点も多く、提案から約 30 年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。スピン 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ン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/半導体接合界面でスピンの効率良く伝播するということであり、界面形成法が重要となる。また後者については、細線チャネル化や短チャネル化が有効な方法として期待されている。

このような背景の下、我々は、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 SOC が大きく高い電子移動度を示す InAs および InAs よりワイドバンドギャップの GaAs といった III-V 半導体と in-situ で複合化した GaAs(111)B 上の MnAs/GaAs/InAs 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ン散乱の抑制を狙うものである。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]。これまでにヘテロ構造作製と評価 [Md. E. Islam and M. Akabori: JCG463(2017)86]および横型スピンバルブ素子の作製ならびにスピン信号の検出や~77K での信号増大 [Md. E. Islam and M. Akabori: Physica B532(2018)95, Md. E. Islam, K. Hayashida, M. Akabori: AIP Advances9(2019)115215]の成果を上げてきた。また未発表だが、GaAs 挿入層の成長直後に積層欠陥が導入されている可能性があることも分かかってきており、我々が従来行っていた、スパッタ成膜 FM と MBE 成長 In(Ga)As₂ 次元電子ガス(2DEG)との組み合わせによるもの [M. Akabori, S. Yamada: STAM5(2004)305, M. Akabori, K. Suzuki, S. Yamada: J. Superconductivity 18(2005)367, H. Choi, A. Nogami, T. Kakegawa, M. Akabori, S. Yamada: Physica E40(2008) 1772, S. Hidaka, M. Akabori, S. Yamada: APEX5(2012)113001]と比べ優位性が示されている。

以上の成果は、1 層の MnAs を表面側に有するヘテロ構造を利用した横型スピンバルブ素子によるものであるが、細線チャネル化や短チャネル化には至っていない。他方、IRDS 中の More Moore カテゴリーにおいては、高機能化・高集積化のため、縦型ゲートオールアラウンド FET(GAA-FET)が近年検討されており、Beyond CMOS カテゴリーのスピン FET についても縦型 GAA の検討は重要と考えられる。加えて、縦型であれば短チャネル化も容易となり、スピン緩和抑制につながると考えられる。しかしながら、縦型チャネルとして利用可能な厚さの III-V 層を MnAs と MnAs の間に挿入した報告例はない。したがって、図 1(c)のような「厚い III-V 層を有する MnAs/III-V/MnAs ヘテロ構造の実現は可能か」ということと、図 1(d)のような「縦型 GAA スピン FET にすればスピン緩和が抑制されスピン信号強度が増大するか」ということが、研究開始当初の本研究課題の核心をなす学術的な「問い」であった。

2. 研究の目的

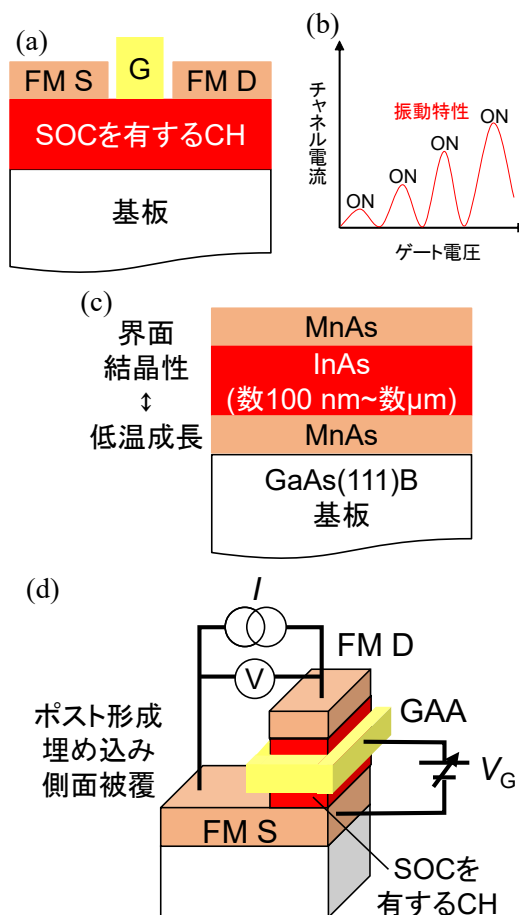


図 1 (a)スピン FET 構造と(b)理想的な伝達特性
本研究で作製を目指す(c)ヘテロ構造と
(d)縦型 GAA スピン FET

本研究では、図 1(c)のような MnAs/III-V/MnAs ヘテロ構造の結晶成長を分子線エピタキシーにより行う。成長条件や膜厚・層構造に対して構造評価や電気・磁気特性評価を系統的に行い、最適化を進める。さらに、それらヘテロ構造を利用して、図 1(d)のような縦型 GAA スピン FET を目指して縦型スピンドバイス作製技術の確立とデバイス特性評価を行い、特に縦型・短チャンネル化によるスピン緩和抑制について検証する。以上を本研究の目的とした。

本研究は、(a)MnAs の c 軸が面直になる(111)B 上に、(b)スピン軌道結合の強い InAs をチャネル材料とし、(c)縦型スピンドバイス作製を行う、という 3 点の大きな特徴を有している。このうち(a)(c)に関しては、1990 年代の終わりから 2000 年代の前半にかけて精力的に研究が進められ、GaAs や AlAs のみならず InAs をトンネル障壁層として用いた縦型トンネル磁気抵抗素子 (TMR)[M. Tanaka and K. Takahashi, JCG227-228(2001)847 など]の報告もされているが、縦型チャネルとして利用可能な厚さの III-V 層を MnAs と MnAs の間に挿入した報告例はない。さらに(b)に関しては他では行われておらず、この点で本研究は独自性の高い研究である。また、III-V 半導体を用いたスピンバルブ素子に関する研究は、ほとんどが(001)上の横型素子により行われており、結晶学的に異なる(111)B 上で行うこと、また縦型・短チャンネル化された素子で行うことで、スピン緩和抑制などスピン伝播に関する新たな知見を得ることが可能である。さらに FM の磁化方向が適切に制御できれば、そのままスピン FET として機能することが期待される。

3. 研究の方法

まず予備的な実験として、MBE を用いて GaAs(111)B 上に 300°C以下での InAs 薄膜成長を行った。続いて、GaAs(111)B 上に MnAs を 250°C程度の低温 MBE 成長し、その上に 100 nm から 1 μ m 厚の InAs 薄膜と表面側 MnAs の連続成長を試みた。成長後の表面形状・結晶構造の構造評価と電気・磁気特性評価をそれぞれ原子間力/磁気力顕微鏡 (AFM/MFM)・X 線回折装置(XRD)・ホール効果測定装置・磁気特性測定装置(MPMS)により行った。

以上とは別に、原子層堆積 (ALD)・スピンオングラス(SOG)材料・反応性イオンエッチング(RIE)・マスクレス露光(MLA)・電子線リソグラフィ(EBL)等の装置を駆使して、高アスペクト比ポスト構造形成とその埋め込みの検討をダミー基板上で行い、デバイスプロセス条件の確立を進めた。その後、GAA のない 2 端子の縦型スピンドバイス素子の作製を行った。そして、作製したスピンドバイス素子について、現有の超伝導マグネット(SCM)と計測システムにより、スピンドバイス特性の評価を行った。

4. 研究成果

本研究では残念ながら当初計画通りの進捗は得られなかったが、期間中に主として以下の成果を得ることができた。

(1) 低温成長 InAs 薄膜の電気的特性[2022 年応用物理学会北陸・信越支部学術講演会にて発表]

MBE を用いて 250°Cおよび 300°Cの低温で GaAs(111)B 上に厚さ約 1.5 μ m の InAs 薄膜を成長し、それらのホール効果測定を行った。その結果、図 2(a)(b)のように、どちらの試料も 20-300 K で n 型を示し、電子密度・移動度ともに緩やかな変化を示した。また、図 2(c)(d)のように、GaAs(001) 上での文献値と比較すると、高い電子密度・低い移動度となっており、(111)B 上では電子供給するアンチサイト As 密度が高くなっている可能性が示唆された。

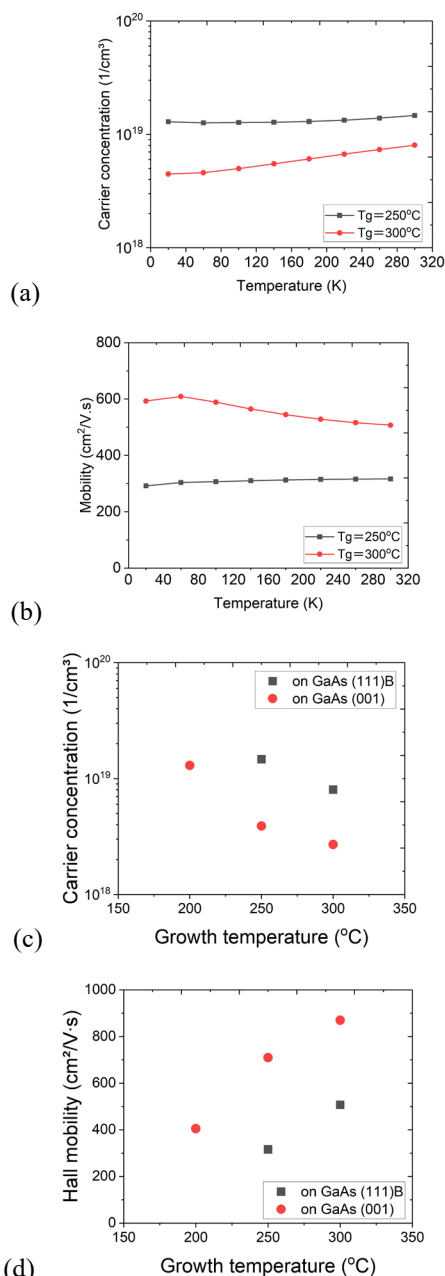


図 2 GaAs(111)B 上に MBE 成長した低温成長 InAs のホール効果測定結果
(a)電子密度の測定温度依存性
(b)電子移動度の測定温度依存性
(c)室温電子密度の成長温度依存性
(d) 室温電子移動度の成長温度依存性

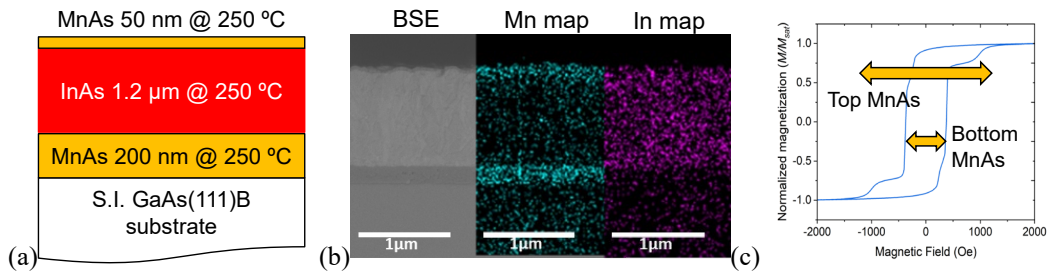


図 3 (a)試料断面模式図 (b)SEM-EDS 観察結果 (c)4K での MPMS 測定結果

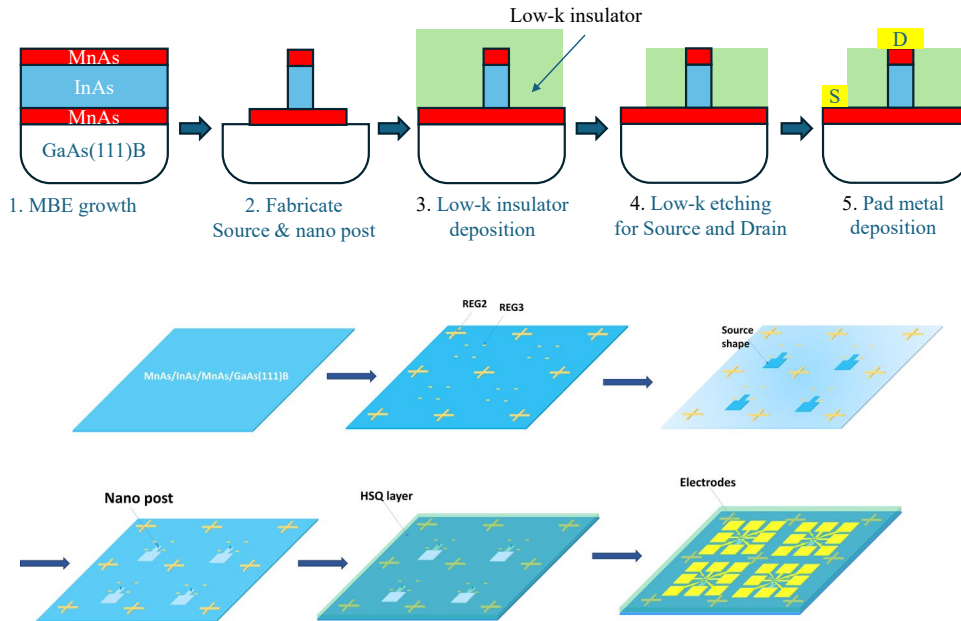


図 4 デバイスプロセスの模式図(上:断面図、下:鳥観図)

- (2) MnAs/InAs/MnAs ヘテロ構造の低温 MBE 成長と評価[EM-NANO 2023 にて発表、Md. T. Islam et al.: JJAP63(2024)01SP37 として掲載]

図 3(a)のように MBE を用いて 250°C の低温で GaAs(111)B 上に MnAs/InAs/MnAs ヘテロ構造を成長し、走査電子顕微鏡-エネルギー分散 X 線スペクトル(SEM-EDS)観察および MPMS 測定を行った。その結果、図 3(b)のように、ほぼ設計通りのヘテロ構造になっていることが確認された。また、図 3(c)のように 4 K の極低温においてダブルステップ構造を有する磁化曲線が得られた。これは、基板側と表面側の MnAs の厚さならびに表面粗さに起因した保磁力差によるものと思われ、磁化の大きさと MnAs の厚さから、小さな保磁力のレスポンスが基板側 MnAs、大きな保磁力のレスポンスが表面側の MnAs と結論付けた。

- (3) MnAs/InAs/MnAs ヘテロ構造を利用した縦型スピバルブ素子の作製と評価[2023 年応用物理学会北陸・信越支部学術講演会、2024 年応用物理学会春季学術講演会、2024 年応用物理学会北陸・信越支部有機無機シンポジウムにて発表、SSDM2024 へ投稿中、学術論文投稿準備中]

図 3(a)と同様で膜厚の異なる MnAs(70 nm)/InAs(400 nm)/MnAs(140 nm)/GaAs(111)B 基板をウエハとし、MLA・EBL・RIE・SOG 埋め込み・金属蒸着等を用いて図 4 のようなデバイスプロセスを施して、縦型スピバルブ素子の作製を行った。図 5 は素子作製上も最も重要となる、ステップ 2 のナノポスト形成後の SEM 写真であり、ほぼ設計通りにナノポストのサイズを制御して同一チップ上に形成できていることがわかる。素子作製後は SCM と DC の計測システムを用いて、スピバルブ特性の評価を行った。図 6 は同一チップ上で異なるナノポストサイズを有する素子のスピバルブ特性である。各素子へは 20 mV の定電圧を印加し、±200 mT (2000 Oe)までの磁場を面内方向に掃引した。測定前に導通が失われた素子を除き、異なるナノポストサイズを有する素子で明瞭なスピバルブを確認することができた。また、サイズが異なってもスピバルブのピーク位置はほぼ変わらなかった。スピバルブ特性の測定温度と同じ温度でウエハの磁化曲線を測定し、微分解析したところ、スピバルブのピークは微分磁化曲線のディップ、すなわちダブルステップ構造のステップ間に相当していることがわかり、狙い通りに表面側と基板側の MnAs の保磁力差によってスピバ

ルプが実現できていることが明らかとなった。

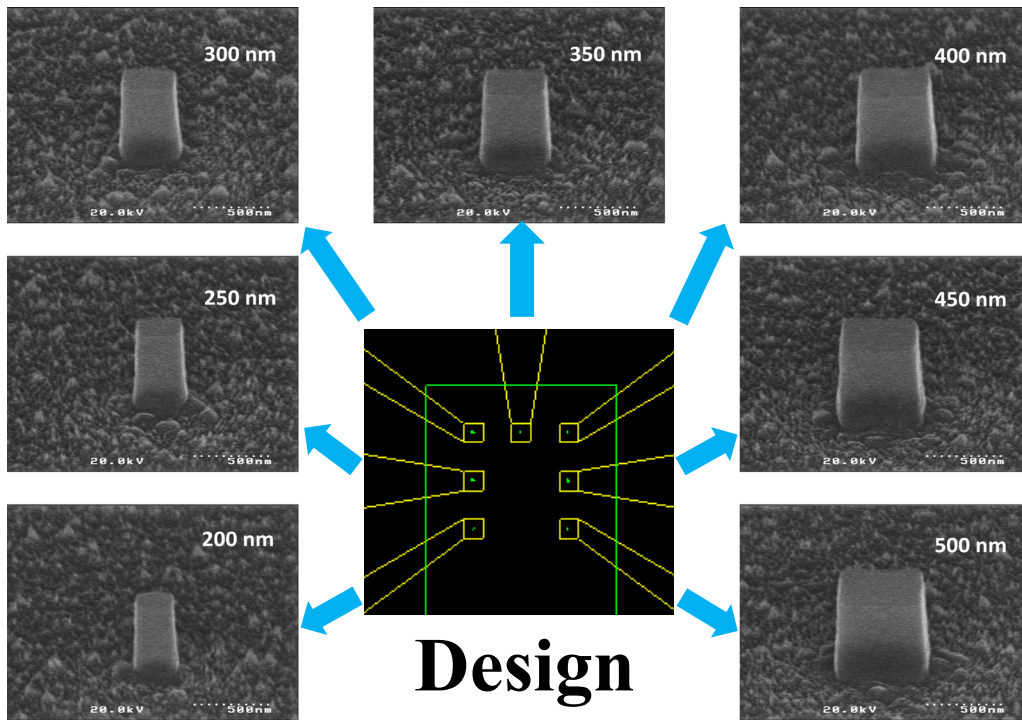


図5 ナノポスのSEM写真

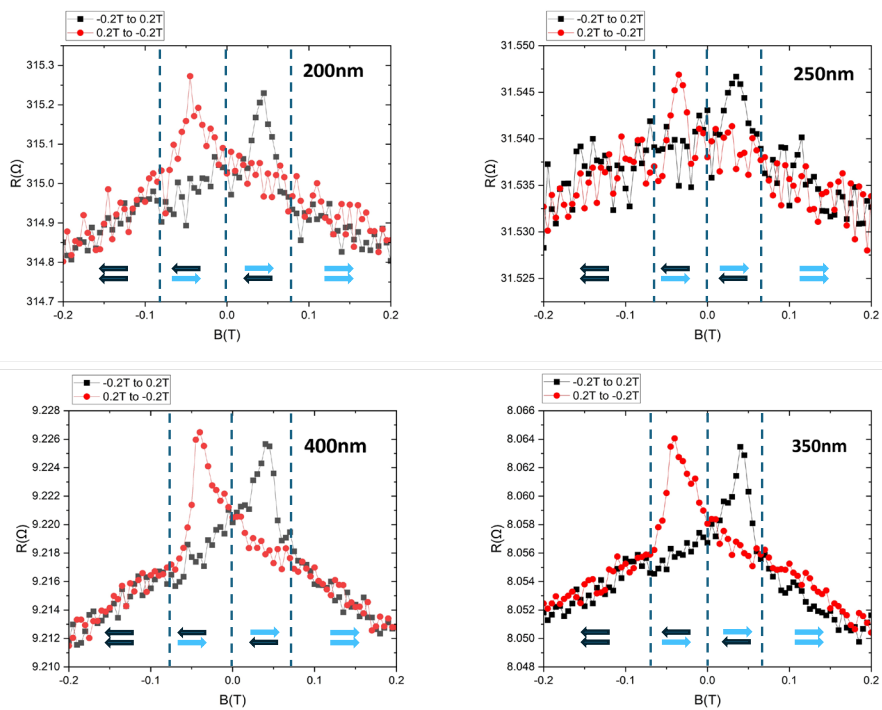


図6 スピンバルブ特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Teramoto Keigo, Horiguchi Ryoma, Dai Wei, Adachi Yusuke, Akabori Masashi, Hara Shinjiro	4. 巻 259
2. 論文標題 Tailoring Magnetic Domains and Magnetization Switching in CoFe Nanolayer Patterns with Their Thickness and Aspect Ratio on GaAs (001) Substrate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2100519 ~ 2100519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202100519	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 Sudo Shinya, Akabori Masashi, Uno Munenori	4. 巻 61
2. 論文標題 Fabrication of Josephson junctions by single line etching of Nb thin films utilizing nitrogen-gas-field ion-source focused ion beam	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SB1016 ~ SB1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac2ab4	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 Islam Md Tauhidul, Kabir Md Faysal, Akabori Masashi	4. 巻 63
2. 論文標題 Low-temperature grown MnAs/InAs/MnAs double heterostructure on GaAs (111)B by molecular beam epitaxy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 01SP40 ~ 01SP40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad01c5	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 Komatsu Soh, Akabori Masashi	4. 巻 63
2. 論文標題 Spin-filter device using the Zeeman effect with realistic channel and structure parameters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 02SP14 ~ 02SP14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad0596	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 Kabir Md Faysal、Islam Md Tauhidul、Komatsu Soh、Akabori Masashi	4. 巻 63
2. 論文標題 Growth temperature dependence of MnSb synthesis on GaAs (111) B using molecular beam epitaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 01SP37 ~ 01SP37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acffd1	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 Hara Shinjiro、Dai Wei、Horiguchi Ryoma、Kanetsuka Wataru、Akabori Masashi	4. 巻 261
2. 論文標題 Incremental Analysis of Magnetic Domains in Multiple Types of Ferromagnetic CoFe Nanolayer Patterns	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2300529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202300529	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18件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Md Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Low Temperature Growth of InAs on GaAs (111)B
3. 学会等名 JSAP Hokuriku-Shinetsu Chapter Annual Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Md Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Growth and Structural Properties of Low-temperature grown InAs/MnAs Hybrid Structure on GaAs (111)B
3. 学会等名 The 70th JSAP Spring Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Sudo, M. Akabori, M. 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 8th 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 W. Kanetsuka, M. Akabori, T. Chen, Y. 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 8th 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 Md Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Low Temperature Growth of InAs on GaAs (111)B
3. 学会等名 JSAP Hokuriku-Shinetsu Chapter Annual Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Md Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Growth and Structural Properties of Low-temperature grown InAs/MnAs Hybrid Structure on GaAs (111)B
3. 学会等名 The 70th JSAP Spring Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thuan Van Pham, Md Tauhidul Islam, Soh Komatsu, Masashi Akabori
2. 発表標題 Fabrication and Characterization of Vertical Spin Valve Devices Based on MnAs/InAs/MnAs/GaAs(111)B with several hundred nanometer width
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Faysal MD KABIR, Md Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Molecular Beam Epitaxial Growth of MnSb, InSb and MnSb/InSb on GaAs (111) B for spin device application
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田島 正啓、赤堀 誠志
2. 発表標題 GaAs/InAs コアシェルナノワイヤを用いた スピンバルブデバイスの作製・評価
3. 学会等名 令和5年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Van Thuan Pham, Md. Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Fabrication and Measurement of Vertical Spin Valve Devices Based on MnAs/InAs/MnAs/GaAs(111)B
3. 学会等名 令和5年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Md. F. Kabir, M. Akabori
2. 発表標題 Growth and characterization of MnSb and InSb on GaAs (111)B using molecular beam epitaxy for spin-FET application
3. 学会等名 7th International Symposium on Frontiers in Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Md. T. Islam, T. V. Pham, Y Ma, M. Akabori
2. 発表標題 Lateral and Vertical Spin Valve Devices Using Molecular Beam Epitaxial Grown MnAs/InAs Hybrid Structures
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Nanotechnology and Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Md. T. Islam, Md. F. Kabir, M. Akabori
2. 発表標題 Molecular beam epitaxial growth of MnAs/InAs and MnSb/InSb hybrid structures for spintronic device applications
3. 学会等名 The 4th International Workshop on Advanced Materials and Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Hara, M. Akabori
2. 発表標題 Magnetic Domain Analysis of CoFe/MgO Nanolayer Electrode Patterns for Spin-Injection into Semiconducting Nanowires
3. 学会等名 The International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS Processing, Fabrication, Properties, Applications (THERMEC 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Soh Komatsu, Masashi Akabori
2. 発表標題 Design of semiconductor spin-polarizer utilizing the Zeeman effect
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Md Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Low-temperature grown MnAs/InAs/MnAs double heterostructure on GaAs (111)B by molecular beam epitaxy
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yingshu Ma, Masashi Akabori
2. 発表標題 H2SO4/H2O2 digital wet etching of GaAs and InAs for nanostructure fabrication
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Md Faysal Kabir, Md Tauhidul Islam, Masashi Akabori
2. 発表標題 Growth temperature dependence of MnSb synthesis on GaAs (111)B using molecular beam epitaxy
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------