

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289100

研究課題名(和文) Datta-Das型スピン FETを用いた超省エネルギー論理回路実用化の研究

研究課題名(英文) Realization of very low power dissipation logic circuit device by using Datta-Das spin-FET

研究代表者

山田 省二 (Yamada, Syoji)

大阪工業大学・教育センター・教授

研究者番号：00262593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、以前、Datta-Das spin-FETに近いSV素子において得られた、高いスピン注入効率と極めて長いスピン拡散長を抛り所とし、上記spin-FET及びそれらを2個組み合わせたインバータ素子の試作とその動作確認を最終的な目標として、様々な具体的な課題解決に取り組んだ。最大の難関は、再現性の良い特性が得られる素子の試作過程での、強磁性体電極と絶縁膜(Al₂O₃)を介したトップゲートのプロセス確立であった。その結果以前のSV特性の完全な再現には至らなかったが、10 μm以下の強磁性体電極間隔をもつデバイスでスピン情報の伝達を確認でき、最終的にインバータ素子の原型試作まで到達できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, based on the results obtained in former spin-valve device (close to spin-FET) measurements (high spin injection efficiency, 11 %, and long spin diffusion length, over 5 maivcro-m), we have studied several problems toward the realization of spin-FET as well as spin-FET based Inverter devices. Most difficult problems are found in the device fabrication process such as making ferromagnetic electrode with reliable magnetic properties on the InGaAs hetero-junction surfaces and top-gates via Al₂O₃ insulator film. As a result, we have succeeded to make spin valve, spin-FET and prototype spin-Inverter devices.

研究分野：半導体物理学、半導体工学

キーワード：スピバルブ素子 強磁性電極 スピンFET論理回路

1. 研究開始当初の背景

1990年に提案された半導体中のスピン軌道相互作用 (spin orbit interaction, SOI) をその動作原理とする、いわゆる Datta-Das 型 spin-FET [1] (図1) は、十分に大きい構造非対称起因の Rashba 型 SOI をもつ狭ギャップ半導体ヘテロ接合材料が確認されて以降、この15年程その実現が研究されてきた。しかしながら、強い SOI が同時にもたらす早いスピン緩和時間 = 短いスピン拡散距離は、デバイスサイズに厳しい条件 (sub- μm 以下) を課し、有望な材料系 (InGaAs ヘテロ接合) では、未だその実現に必要な信頼できるプロセス技術は確立しておらず、標記 FET は現在でも実現していない。

しかしながら、われわれは数年前に、通常の強磁性体 (CoFe) ストライプ電極を高 In 組成 InGaAs/InAlAs ヘテロ接合に付加したスピンバルブ (spin-valve, SV) 素子において、約 11% のスピン注入効率と約 5 μm という極めて長いスピン拡散長を確認した [2] (1.5 K、図2)。類似の材料系・素子でもやはり 2 μm 程度の値が観測されており [3]、これらの結果は、適当な条件下 (まだ未解明であるが、不完全なスピンらせん状態等 [4]) では、スピン緩和長が著しく延伸する場合があることを示唆している。

この結果は、従来困難視されてきた Datta-Das 型 spin-FET の実現とそれを基礎とした超省エネルギー論理回路 [5] の開発に現実的な展望が開けたことを意味する。

2. 研究の目的

本研究では、まず前節で述べた、強い SOI をもつ材料でのスピン輸送における長いスピン拡散長を実現するためのデバイス作製条件の詳細検討を行う。その結果を生かして SV 素子並びに spin-FET を作製し、計画通りの長いスピン拡散長を特徴とするスピン輸送を確認・解析する (極低温) ことを目的とする。最終段階では、2 個の spin-FET を組み合わせたインバータを試作し、その基本的動作確認もねらう。

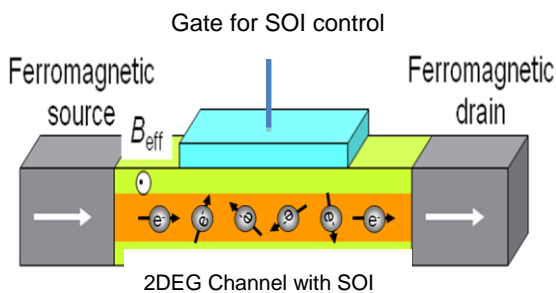


図1 SOI を動作原理とする spin-FET の模式図。スピン間の位相差 $\Delta\theta$ はゲート電圧の関数であるスピン軌道結合定数 $\alpha(V_g)$ と SD 電極間距離の積に比例するので、 I_{SD} vs V_g は振動的に振る舞う。

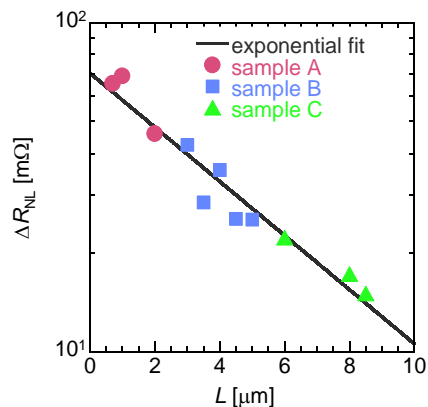


図2 非局所スピンバルブ測定で得られた抵抗変化の電極間距離(L)依存性例

3. 研究の方法

具体的には下記の3つの課題について検討を進める。

(1) スピン注入電極構造等の最適化

① 強磁性電極の磁気特性制御

これまで強磁性体パーマロイ電極の作製は、通常の RF マグネトロンスパッタで行ってきた。前節の SV 測定は、最もうまくいった例でも、試作の回毎に保持力や履歴曲線の形等がばらつくことが多く、最終的な素子の歩留まりが極めて低い場合も多かった。これらの原因は主に、スパッタ時の温度上昇により半導体表面の (酸化) 状態が複雑に変化したり、レジストが劣化してリフトオフ性が極めて悪くなること等にあると考えられた。そこでわれわれは新しい強磁性体膜堆積法を検討した。

② 半導体との界面制御

以前良好なスピン輸送特性が得られた際 [2] は、強磁性体/半導体 (CoFe/InGaAs) 界面はショットキー性ではなく数百 Ω のオーム性であった。このことは、強磁性体金属と半導体との伝導性ギャップを埋めるのに理論的には有効とされたショットキー性の提案 [6] に相反するものである。また、電極強磁性体抵抗の磁場依存性には、強磁性膜の磁化特性を反映した異方性磁気抵抗 (AMR) が出現する。これらの抵抗特性を①とも関連させて詳細に検討する。

(2) ベース半導体ヘテロ接合の再検討

これまで、Datta-Das spin-FET のベース材料には InGaAs 系逆 HEMT 構造 (i-HEMT) が用いられることが多かった。しかしながら、高効率スピン注入の困難さ、SOI 強度の構造的限界等将来のデバイス応用を考えると、必ずしも最適の材料とは言えない。それ故われわれは、i-HEMT 構造 (2 次元電子ガス、two-dimensional electron gas 2DEG、1 層系) を基本としつつ新しい可能性をもつ 2DEG 2 層系についても検討を進めた [7]。

(3) インバータ構成法の検討

Datta-Das spin-FET を用いてインバータを構成するためには、例えば、図 3(b) のような素子を作製すればよい。これは 2 個の FET を、ドレインを共通にしてタンデムに接続したもので、2 つの FET 間の特性をスピン位相で π ずらしておくだけで十分である (例えば、この図では素子長、 L, L' を調整)。この構成は通常の CMOS インバータに比べてはるかに単純であるが、具体的な素子設計は工夫する必要があり、検討を要する。

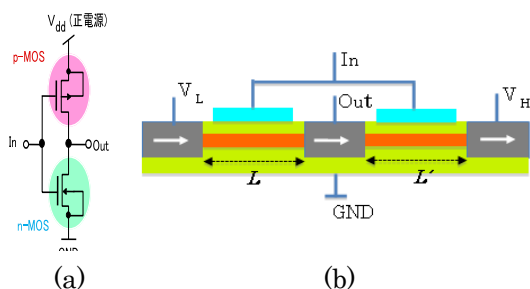


図 3 (a) CMOS インバータの等価回路と (b) spin-FET で構成するインバータの模式図。左右の spin-FET は電極間距離が異なる ($L \neq L'$) ので、同じ入力ゲート電圧 (V_{in}) でも異なる 2 状態 [On と Off] を同時に実現できる。

4. 研究成果

(1) スピン注入電極作製法の検討と半導体界面の電気的制御

① 強磁性電極プロセスの詳細な制御

われわれは、新しく ECR スパッタ法を強磁性電極作製の方法として検討した。この方法では、スパッタターゲットと半導体基板の距離が離れているため、RF スパッタ法に比べて強磁性膜の周り込みが少なく、かつ基盤温度の上昇も抑制される。

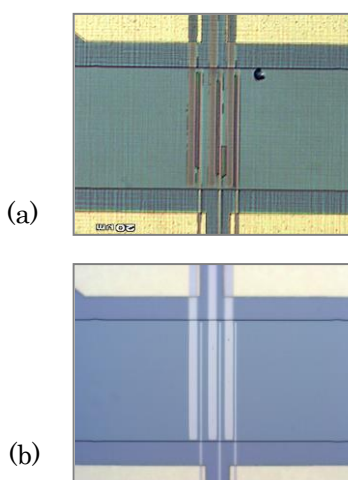


図 4 (a) RF スパッタ法で、また (b) ECR スパッタ法で、それぞれ作製した、半導体メサ上の CoFe ストライプ電極 (厚み 40 nm、幅 1 and 3 μm) の光学顕微鏡写真。明らかにリフトオフ性に改善がみられていることがわかる。

ここでは、強磁性材料としては、 $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ を採用し、製膜前の逆スパッタ [酸化膜を取るために必要とされてきた] は行わない条件を選択した。図 4 に実際に半導体メサ上に作製した強磁性電極の、それぞれの方法による作製例を示す。明らかに、ECR スパッタ法による試料では、CoFe 膜のリフトオフ性が改善しているのがわかる。図 5 は、同様の条件で作製した CoFe ストライプ列集団の磁化特性測定結果である。RF 法による試料は、保持力は大きいものの磁化過程に磁壁移動の際ピン留めが起きており、履歴特性が複雑になっている。これに対し ECR 法の場合は、保持力は小さいものの磁壁移動は滑らかであることが見受けられる。これは、ECR 法により、より欠陥の少ない良質な CoFe 膜が堆積されていることを示唆するものである。

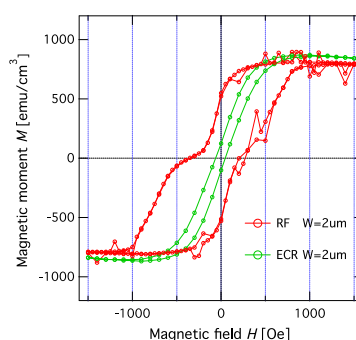


図 5 図 4 の場合と同様の条件で RF スパッタ法、及び ECR スパッタ法でそれぞれ作製した半導体上 CoFe ストライプ列集団の磁化特性。ECR 法による試料でより滑らかな磁化特性が得られている。

② スピン注入電極と半導体との界面制御

図 6(a) に作製した AMR 測定用素子の模式図と CoFe 電極の 2 端子抵抗測定回路、(b) にその測定結果を示す。

それに先立ち行った、CoFe-半導体間の 2 端子 I-V 測定 (図面無し) では、最初の微小電圧印加時は非線形 [トンネル的] な特性であったが、その後電圧 V を増やすと非可逆的に線形 (オーミック) になった。その際の抵抗は、FM1、FM2、FM3 でそれぞれ 940、350、1300 Ω であり、先の SV 測定の場合とほぼ同程度であった。

(b) に示す AMR 信号には、面内掃引磁場 B に対して掃引の向きに依存する 2 つのピークが大体 ± 5 mT (FM1)、 ± 20 mT (FM2) に確認できた。これは、CoFe 電極内の磁壁移動による AMR 効果と考えられ、そのピーク位置は、上述の磁化特性の結果と概ね一致した。

これらよりまず、今回もスピン注入用 CoFe 電極は半導体表面 (2DEG 層から約 50 nm 上) にオーミックに接触しており、界面に障壁はないことが予想される。また、メサを跨ぐ等構造的な複雑さが増しているにも拘らず、CoFe 膜の磁気特性は、ほぼ単純なストライプのときと同様であることも判った。

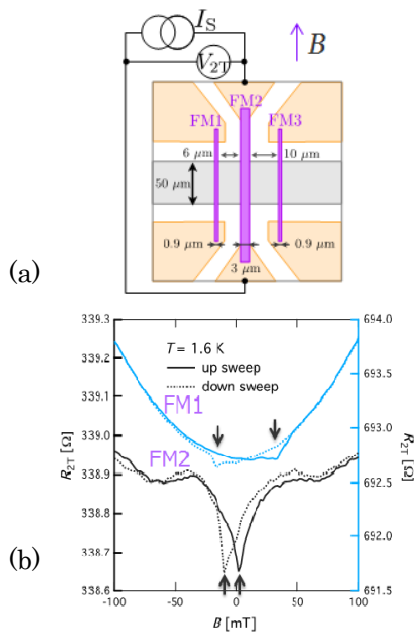


図 6 (a) 作製・測定した AMR 素子と 2 端子抵抗の測定配置。(b) 得られた面内磁場 B に対する磁気抵抗。太さに反比例した磁場値で抵抗に dip が出現しており、それらの値は磁化曲線の保磁力の値とほぼ一致する。

③ スピンバルブ特性

AMR 素子とは別に作製した SV 素子 (CoFe 電極間距離 d が 1-10 μm の様々な値で設定されている) において非局所信号の測定を進めた。測定配置を図 7(a) に示す。しかしながらこの素子で主に観測されたのは、典型的なスピンバルブ信号ではなく、図 7(b) のような、一部局所ホール効果を含むような信号であった。これに含まれる 2 つのピーク (L, R と表示) 磁場位置に本来のスピンバルブ信号が見えるはずである。その意味で、この信号自体が一定程度 CoFe 電極間のスピン情報の伝達に関連するものであると考え、とりあえず 2 つのピーク高さ [矢印で表示] の電極間隔 d 依存性をプロットした (図 7(c))。これから緩やかな依存性は認められるものの、本来この研究での注目点の一つとしていた、面内結晶方位依存性ははっきりしなかった。したがって、SOI の異方性と関連して出現するはずのスピン伝達特性の異方的な結果はこの時点では確認できていない。

(2) ベース半導体ヘテロ接合

新しい狭ギャップ半導体ヘテロ接合構造として、ここでは 2DEG 2 層系を検討した結果を一部述べる。即ち、様々な構造のうち、特に表面反転層 2 層系を取り上げる。

そのような試料の層構造例を図 8(a) に示す。これは基本的には i-HEMT 構造であるが、表面 InGaAs チャネルの厚みが通常より大きく 100 nm である。このような構造に表面ゲートを付加すると、表面ゲート電圧 $V_g = 0$ V のとき最表面の表面反転層内とチャネル下部の InAlAs 界面の両方に 2DEG が存在する

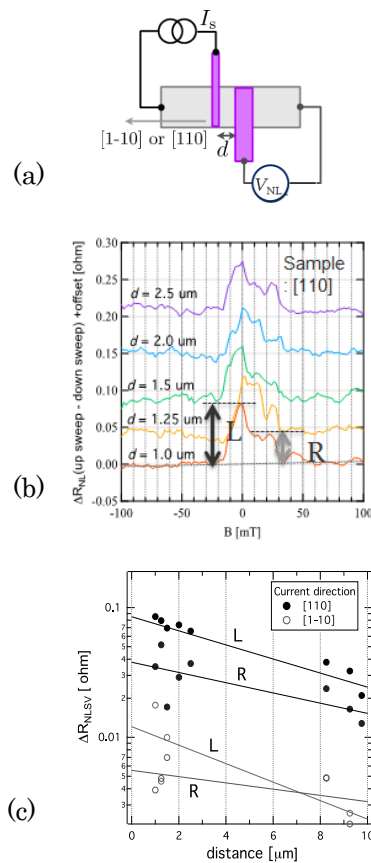


図 7 (a) SV 素子における非局所電圧測定配置 (電極間隔 d)。 (b) 非局所測定で得られたダブルピークの信号。局所ホール効果も含むと考えられるが、それぞれのピーク磁場位置は SV 信号が出現する磁場とほぼ一致。(c) ピーク高さの電極間距離 d 依存性プロット。

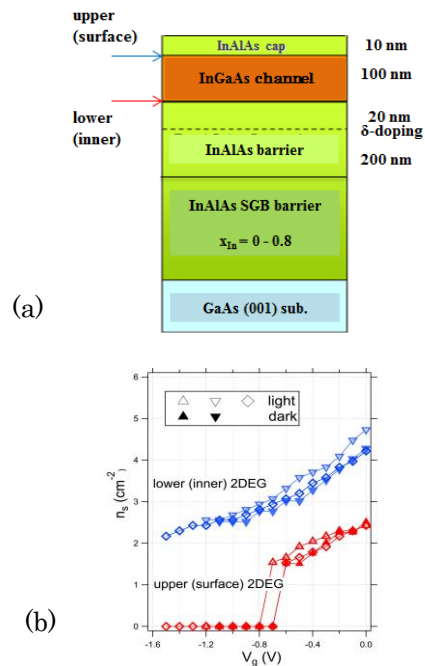


図 8 (a) 表面反転層をもつ i-HEMT 構造の層構成。InGaAs チャネルが比較的厚い (100 nm)。 (b) InGaAs チャネルの表面 (upper) と下界面 (lower) に存在すると思われる 2DEG 濃度のトップゲート電圧 V_g 依存性。

ことがわかった。 V_g を負に大きくしていくと上側＝表面反転層の2DEGの濃度は次第に減少し、やがて空乏化することも確認された(図8(b))。これは、2層系と1層系とをゲートでスイッチできることを意味し、新たなスピンドバイスへの応用も考えられる。

この試料での強磁場量子ホール効果では、2層系から1層系へと遷移する準安定な状態で、特に分母が3の分数量子ホール効果プラトーが観測されるという新現象も発見したが、ここではスペースがないため、詳細には立ち入らない。

(3) spin-FET インバータの設計と試作

特に(1)で述べた内容を含む、素子作製プロセスの様々な検討結果を踏まえ、研究の最終段階で、spin-FETを組み合わせたインバータ素子の原型の試作を行った。図9(a)に構成案を、また(b)に試作したインバータ素子の光学顕微鏡写真を示す。左はL型と呼ぶべきもので、2つのspin-FETが直交して配置され、共通のオーミックドレインをもっている。この場合はSOIの面内異方性が、2つのFETの特性の差を与える要素となりうる。右は2つのFETを π 型に配置したもので、やはり共通のドレインをもつ。こちらでは、インバータ動作に必要な特性の差を与えるために回路上の工夫が必要である。

図9(b)に示した作製済の殆どの素子に対し、オーミック電極、強磁性電極のオーム性は既にチェックされ、その特性に大きな問題はないことを確認している。ただ、この報告作成時以前にはこれらの素子の系統的な特性測定は間に合わなかった。今後測定を進め、順次外部発表していく予定である。

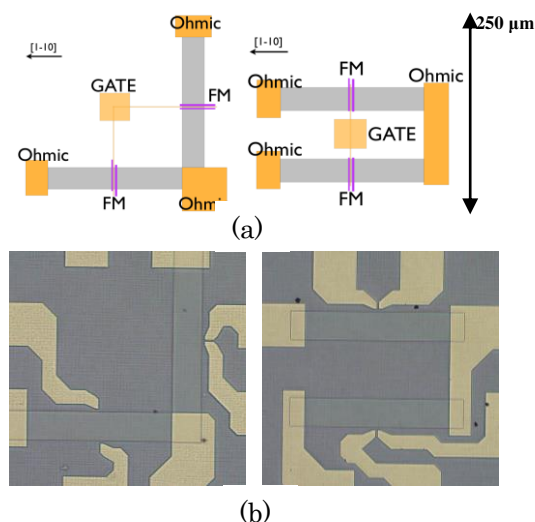


図9 (a) 2個のspin-FETで構成するインバータの試作案。左：L型、右： π 型。(b) 実際に試作したインバータの光学顕微鏡写真。同じく、左：L型、右： π 型。

(4) まとめ

本研究では、以前われわれのグループで得られた、Datta-Das spin-FETに近いSV素子において、高いスピン注入効率と極めて長いスピン拡散長が得られたことを拠り所とし、上記spin-FETにとどまらずそれらを2個組み合わせさせたインバータ素子の試作とその動作確認を最終的な目標として、様々な具体的な課題解決に取り組んできた。

予想されたとおり最大の難関は再現性の良い特性を与える素子の試作で、中でも強磁性体電極と絶縁体(Al_2O_3)を介したトップゲートのプロセス確立に手古摺った。その結果以前のSV特性を完全に再現するには至らなかったが、 $10\ \mu m$ 以下の強磁性体電極間隔で、何とかスピン情報の伝達を確認でき、最終的にインバータ素子の原型の試作まで進めることができた。

また、予想しなかった成果としては、2DEG 2層系構造の様々な興味深い輸送物性が明らかになった。特に、分数量子ホール効果についての新しい知見(よりロバストな条件での $q/3$ プラトーの観測等)も得られ、本研究の意義はより深まったと考えている。

参考文献

- [1] S. Datta and B. Das: Appl. Phys. Lett. **56** (1990) 665.
- [2] S. Hidaka et al., Appl. Phys. Express, **5** (2012) 113001.
- [3] H. C. Koo et al., Science, **325** (2009) 1515.
- [4] J. Schliemann and D. Loss: Phys. Rev. **B68** (2003) 165311.
- [5] E. Dmitri et al., J. of Superconductivity, **21**, (2008) 479.; Kondo et al (Toshiba Co. Ltd.), Private communication.
- [6] G. Schmidt et al., Phys. Rev B **62** (2000) R4790.
- [7] M. Akabori, et al., J. Appl. Phys. **112**, 113711 (2012).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件) (全て査読有り)

- 1) D. Yamamoto and T. Tsuchiya, **Efficient control of the Rashba effective magnetic field using Acceptor-doped quantum wells**, J. Phys. Soc. Jpn, **83**, 124701-124706 (2014).
- 2) M. Akabori, S. Hidaka, S. Yamada, T. Kozakai, O. Matsuda and A. Yasaka, **High-In-content InGaAs quantum point contacts fabricated using focused ion beam system equipped with N_2 gas field ion source**, Jap. J. Appl. Phys. **53**, 118002-1-3 (2014).

〔学会発表〕(計 15 件)

- 1) 日高志郎、岩瀬比宇麻、赤堀誠志、山田省二、今中康貴、高増 正、**InGaAs 2次元電子ガス 2層系におけるサブバンド輸送と量子ホール効果**、電子情報通信学会、電子デバイス研究会 2013年8月 富山県、富山大学
 - 2) 胡ガイ、張儲君、日高志郎、岩瀬比宇麻、赤堀誠志、山田省二、**新構造 InGaAs 2次元電子ガス 2層系のサブバンド輸送解析**、日本物理学会第 69 回年次大会、2014年3月、神奈川県、東海大学
 - 3) 石田晋一、胡ガイ、張儲君、日高志郎、岩瀬比宇麻、赤堀誠志、山田省二、今中康貴、高増 正、**InGaAs 2次元電子ガス 2層系における量子ホール効果**、日本物理学会第 69 回年次大会、2014年3月、神奈川県、東海大学
 - 4) 胡ガイ、張儲君、日高志郎、岩瀬比宇麻、赤堀誠志、山田省二、**中心に InAlAs 障壁層をもつ 2次元電子ガス 2層系のサブバンド構造**、日本物理学会第 70 回年次大会、2015年3月、東京都、早稲田大学
 - 5) 大堀高寛、赤堀誠志、日高志郎、山田省二、**高 In 組成メタモルフィック InGaAs/InAlAs ヘテロ接合を用いたゲート付細線構造の評価**、日本物理学会第 70 回年次大会、2015年3月、東京都、早稲田大学
 - 6) M. Akabori, T. Ohori, S. Hidaka, S. Yamada, A. Yasaka, **Top-down fabrication and electrical characterization of InGaAs/InAlAs quantum nanostructures**, Int. Symp. On Nano-Materials, Technology and Applications (invited), Hanoi, Vietnam, Oct. 2014.
 - 7) S. Hidaka, H. Iwase, M. Akabori, S. Yamada, Y. Imanaka, K. Takehana, **Traces of fractional quantum Hall plateaus in asymmetric two-dimensional bilayer system in wide InGaAs well**, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.
 - 8) T. Ohori, M. Akabori, S. Hidaka, S. Yamada, **Fabrication and characterization of gated parallel wire structures having a metamorphic InGaAs / InAlAs heterojunction with high In content well**, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.
 - 9) K. Hu, S. Hidaka, H. Iwase, M. Akabori, S. Yamada, **Subband transport in two-dimensional electron gas bilayer system in narrow InGaAs well with center InAlAs barrier**, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.
 - 10) Y. Imanaka, K. Takehana, S. Hidaka, H. Iwase, M. Akabori, S. Yamada, **Cyclotron resonance in InGaAs Rashba bilayer system**, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.
 - 11) 山田省二、藤元章、赤堀誠志、**高 In 組成 InGaAs/InAsAs 2次元電子ガス 2層系スピントラップ効果観測の基礎検討**、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月、大阪府、関西大学
 - 12) 山田省二、今中康貴、竹端寛治、赤堀誠志、**InGaAs/InAlAs 2次元電子ガス 2層系における分数量子プラトウの痕跡**、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月、大阪府、関西大学
 - 13) 山田省二、藤元章、添田幸伸、赤堀誠志、**InGaAs 2次元電子ガス 2層系における共鳴スピントラップ効果測定**、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、宮城県、東北学院大学
 - 14) 添田幸伸、赤堀誠志、藤元章、山田省二、今中康貴、竹端寛治、**表面反転層高 In 組成 InGaAs 2次元電子ガス 2層系におけるサブバンド構造と量子ホール効果**、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、宮城県、東北学院大学
 - 15) 添田幸伸、日高志郎、赤堀誠志、山田省二、**高 In 組成 InGaAs 2次元電子ガスにおけるスピントラップ特性の結晶方位依存性**、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、宮城県、東北学院大学
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
山田 省二 (Yamada Shoji)
大阪工業大学・教育センター・教授
研究者番号：00262593
 - (2) 研究分担者
土家 琢磨 (Tsuchiya Takuma)
北海道大学・工学(系)研究科(研究院)
・准教授
研究者番号：40262597
 - (2) 研究分担者
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