

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04631

研究課題名(和文) InGaAs量子井戸2層電子系による多値論理素子開発の研究

研究課題名(英文) Study of multi-value spin-logic device development using InGaAs quantum well bilayer electron systems

研究代表者

山田 省二 (Yamada, Shoji)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：00262593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： InGaAs 2次元電子ガス2層系デバイスでは、スピン論理素子デバイスの開発を目指し、スピン流を露わに観測してその厳密なチェックが可能な新しい素子構造の提案と試作を進め、デバイス特性の解析を行った。その結果、スピンバルブ型スピンFETにおいて、スピン流のゲート電圧依存性に振動現象を確認できた。これは、スピン歳差運動がゲート制御されていることの証拠であり、スピンFETで期待される典型的な振舞である。

GaN 2次元電子・ホールガス2層系では、低磁場、高磁場における精密磁気抵抗測定から、従来殆ど報告の無かった2次元ホールガスの低磁場スピン分裂 = スピン軌道相互作用を始めて解明することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

InGaAs系材料を用いたスピンFETについては、2009年頃動作確認の最初の論文が出されたが、その後追試の報告は無い一方で、時々なされる他の材料系でのスピンFETの提案も実用化を考えると現実的でない。本研究はデバイスプロセスの改良と新デバイス構造で、InGaAs系でのデバイス実用化にスピン流を直接観測する厳密なデバイス構造で挑み、スピン論理素子実現の直前段階と言えるレベルに到達した。

GaN 2次元電子・ホールガス2層系では、やはり厳密な磁気抵抗測定から、2次元ホールガスのスピン軌道相互作用の解明に初めて成功した。これはGaN 2次元ホールガススピンデバイス開発の扉を開くものである。

研究成果の概要(英文)： In InGaAs 2-dimensional electron gas bilayer devices, we have proposed and fabricated a new device structure that enables the open observation of spin current and its rigorous checking, and analyzed device characteristics with the aim of developing spin-logic devices. As a result, an oscillation phenomenon was observed in the gate voltage dependence of the spin current in a spin-valve type spin FET. This is evidence that the spin precession is gate-controlled, which is a typical behavior expected in spin FETs. In the GaN 2-dimensional electron-hole gas bilayer system, precise magnetoresistance measurements at low and high magnetic fields have revealed for the first time the low-field spin splitting = spin-orbit interaction in a 2-dimensional hole gas, which has rarely been reported before.

研究分野：半導体物理学、半導体スピン工学

キーワード：InGaAs GaN 2次元電子ガス 2次元ホールガス スピン軌道相互作用 ラシュバ分裂 スピンFET スピン論理デバイス

1. 研究開始当初の背景

1990年のDatta-DasによるRashba効果を用いたスピンFET(デバイス)の提案以来、その実証・実現を目指した多くの試みがなされてきたが、極低温においてさえ、韓国のグループによる発表[1]の後にはそれを追従・検証する仕事は多くない。この間類似の努力がほぼ放棄されてきた原因は、恐らく狭ギャップ半導体デバイス作製に伴うプロセス上の困難さにあると考えられる。その一方で、狭ギャップ半導体以外の新規の材料や構造で偶々出現する「巨大」スピン軌道相互作用等を背景にスピンFETの諸提案[2]がなされてきたが、その材料・構造的な特殊さゆえに、実用的なデバイス作製を考えると極めて非現実的である。

[1] H. C. Koo et al., Science 325, 1515 (2009)[2] Takase et al., Appl. Phys. Express 12, 117002 (2019).

2. 研究の目的

本研究における目的は狭ギャップ半導体・強磁性金属(FM, ferromagnetic metal)ハイブリッド素子作製プロセスの高度化・先進化に挑戦することにより、化合物半導体ベースのスピンFETもしくはスピン論理素子を実現することである。より具体的には、これまで厳密な意味では実現の確認されていないスピンFET動作を、新構造素子を提案・作成して緻密に検証し、最終的には、論理動作が見込める複合スピンデバイスへと発展させることにある。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、様々な工夫したプロセス技術を用いた数回のデバイス試作と微小電流高感度測定サイクル(1サイクル約半年を要する)を繰り返し、そのスピン物性の本質的解明とスピン流デバイス動作の厳密な確認を進めた。ここでは測定の種類として、非局所スピンバルブ(SV)(磁気抵抗)測定、弱反局在(WAL, weak anti-localization, < 数100 mTesla)測定、精密磁気抵抗(MR, magneto-resistance, 0-15 T)測定などを相互に関連した形で行った。本研究の測定はほとんどの場合極低温に留まっているが、様々な材料的工夫により、さらに高温での動作へと発展させることも可能である。

4. 研究成果

(1) InGaAs 2次元電子ガス2層系デバイス

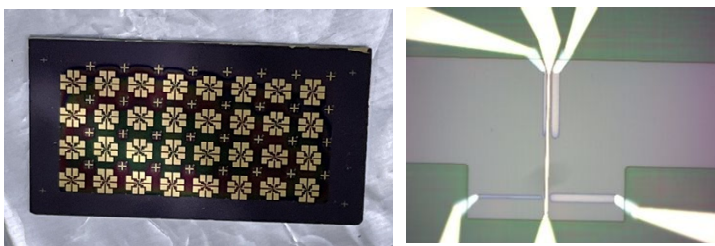
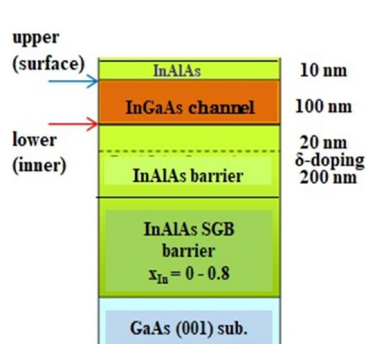


図 1-1 (左) InGaAs 2次元電子ガス2層構造(矢印の部分に2DEGが存在)と(中)採用した最終的な新デバイス構造のプロセス終了直後のウェハ写真及び(右)素子主要部写真(上部:SV素子、下部:SF素子)

1で述べたような背景のもと、われわれは、半導体業界でプロセス技術の蓄積のある化合物半導体(特にGaAs系)に拘り、その関連材料でのスピンFET実現に集中してきた。本研究を含むここ10年来の研究でわれわれが到達した、スピン論理回路の実証研究を厳密な意味で可能にするデバイス形状は図1-1、1-2に示すものである。これは、ゲートをもつスピンバルブ素子(SV素子)とスピンFET素子(SF素子)を同一基板上に近接して配置したものである。ここでCoFe強磁性(FM)電極ペアは、配置(ゲートを挟んで、SVでは近接平行、SFでは同一線上)以外は同一寸法(3×30, 1×30 μm²)なので、基本的に同一のスピンバルブ信号が得られるはずである(FM電極間隔3 μm、ゲート長1 μm)。これにより、スピンFET=SF素子特性のSV素子特性によるチェックが可能となる。換言すると、本デバイス構造で初めて、スピンFET動作(三端子動作)が、スピンバルブ特性のゲート電圧依存性の形で、即ち正しくスピン流に起源をもつ形で、観測できることになる。ちなみに、CoFeはウェハ表面にほぼダイレクトにスパッタ蒸着されているが、ゲート下には数10 nmのAl₂O₃絶縁膜が挿入されている。

次に測定結果に移る。測定は殆ど~4 Kにおける微小交流電流法で行われた。図1-3は面内45°磁場下で測定したSF素

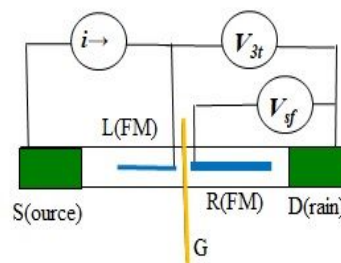
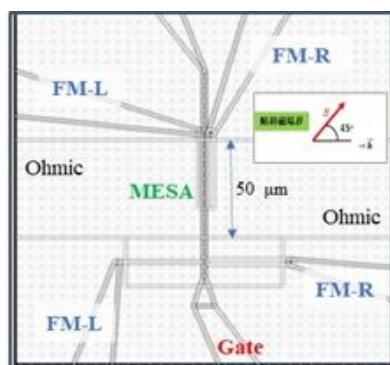
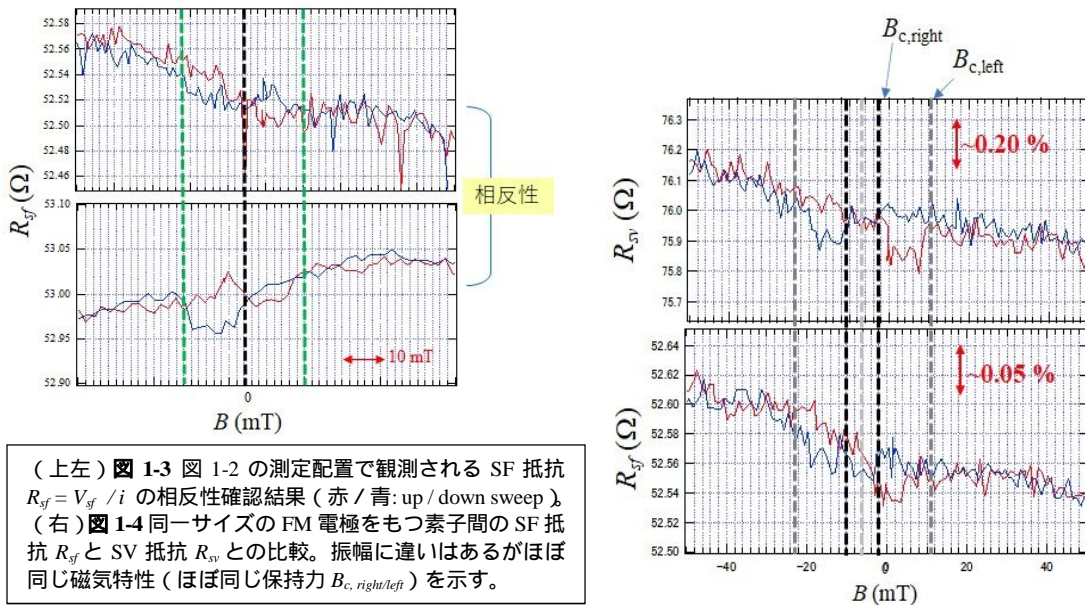


図 1-2 (上)素子主要部の説明(挿入図:面内傾斜磁場配置)(下)SF素子での非局所スピンバルブ測定配置

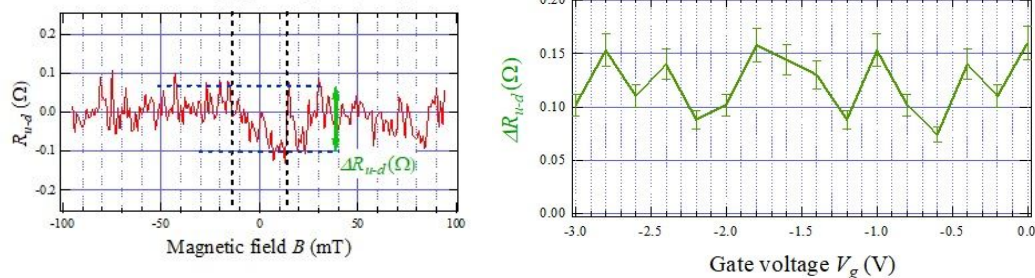
子における非局所 SV 信号である。対応する二端子、三端子抵抗も非局所 SV 信号に整合する形で確認済である。また図 1-4 では、同一基板上の SV 素子での SV 信号と SF 素子での SV 信号との比較を示す。このデバイス構造とスピン拡散長 ($\sim 5 \mu\text{m}$) にもとづく予想通り、振幅に構造起因の違いはあるが(信号振幅: $\text{SV} > \text{SF}$)、両者は良く似た磁氣的振舞いを示していて、両者とも類似 FM 電極間のスピン流であることが確認できる。

図 1-5 には、この SF 素子における SV 信号 (Source-Drain スピン流) の差分信号 $\Delta R_{u-d} = R_{sf(up)} - R_{sf(down)}$ の抽出例、図 1-6 にはそのゲート電圧 V_g 依存性の測定結果例を示す。この結果からわかるのは、 V_g の変化に伴い、スピン流振幅が振動的に変化していることである。この結果はスピン FET で予想される歳差運動の制御を示唆する典型的な特性であり、その周期はスピン軌道結合定数 α で決まる。したがって、 α の V_g 依存性を同時に評価し、両者の対応を確認する必要がある。 α 評価の手法には WAL を用いるものと低磁場磁気抵抗の beat を観測するものがあるが、ここでは、前者が構造的に極めて小さくなるため、信号の明確さの観点から後者を採用している。図 1-7, 8 はその評価例を示すもので、低磁場磁気抵抗 (図 1-7) のフーリエ変換信号 (図 1-8) に現われる 2 つのピーク (upper/lower 2DEG に対応) にそれぞれ分裂が確認できるが、これを Rashba

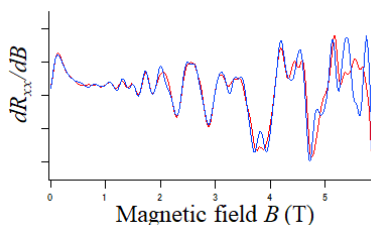


(上左) 図 1-3 図 1-2 の測定配置で観測される SF 抵抗 $R_{sf} = V_{sf} / i$ の相反性確認結果 (赤 / 青: up / down sweep)、(右) 図 1-4 同一サイズの FM 電極をもつ素子間の SF 抵抗 R_{sf} と SV 抵抗 R_{sv} との比較。振幅に違いはあるがほぼ同じ磁気特性 (ほぼ同じ保持力 $B_{c, right/left}$) を示す。

差分信号 $\Delta R_{u-d} = R_{sf(up)} - R_{sf(down)}$ ($V_g = 0$)

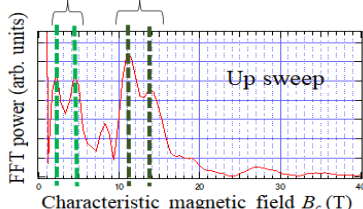


(左) 図 1-5 SF 信号の差分信号 $\Delta R_{u-d} = R_{sf(up)} - R_{sf(down)}$ の評価例 ($V_g = 0$)、(右) 図 1-6 ΔR_{u-d} の V_g 依存性の例



(左上) 図 1-7 Hall パー試料で測定した縦磁気抵抗 R_{xx} の 1 階微分信号 (赤 / 青: up / down sweep)、(左下) 図 1-8 1 階微分信号のフーリエ解析結果。2 層の 2DEG に対応する 2 つのピークがそれぞれさらに分裂していることが解る。

Upper 2DEG Lower 2DEG



分裂とみなすと近似的に α を評価できる。 の値としては、

$$\alpha(\text{beat}) \sim \left(\frac{eh}{2m^* k_F} \right) (\Delta i / \Delta(B^{-1})) (\times 10^{-12} \text{ eVm}) \sim 5 \times 10^{-12} \text{ eVm}$$

が、またスピン分裂 $\Delta E_{\text{beat}} \sim 2 \text{ meV}$ が得られる。これらから求めた $\alpha(V_g)$ により、図 1-6 の果は大体説明できるが、より詳細な定量的議論は現在進行中である。

本研究の結論としては、厳密な意味でのスピン FET の動作は、低温ではあるがほぼ検証・確認できたが、論理動作の確認までには今一步到達出来ていないと言える。

(2) GaN 2次元電子-ホールガス系

この系は広い意味での2層系であるが、企業との共同研究の中で、全く新しい将来のスピンドバイスへの応用可能性を検証すべく、その基礎的物性の解析・評価を開始したものである。層構造は GaN/ALGaN/GaN ヘテロ構造中に2次元電子ガス(2DEG, two-dimensional electron gas)と2次元ホールガス(2DHG, two-dimensional hole gas)が共存するもので(図2-1)、オーミック電極の材料を変えることにより、2DEG、2DHG それぞれ独立に電極の形成が可能である。2DEG については既に報告も多いので、本研究では殆ど報告のない2DHGのスピンの物性に焦点を絞り、極低温磁気抵抗による測定・解析を進めた。



図2-1 (左) 試料P、(右) 試料H。いずれも AlGaIn 層の下側に2DEGが、上側に2DHGが存在する。上部層のエッチングにより2DHG濃度を変えている。室温での電気特性は P/H: シートホール濃度 $n_s \sim 1.3 / 0.32 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 、移動度 $\mu_n \sim 12 / 7 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 。

実際の測定試料は5mm角の van der Pauw 形状で、1.6~5 K の温度範囲で、WAL 測定と通常の MR 測定を行った。図2-2、2-3 にそれぞれの測定結果を示す。図2-2では2DHG濃度の異なる2種類の試料(P, H)に関し、いずれも $B \sim 40 \text{ mT}$ に極小を持つ特性が確認されている。この極小磁場 B_{min} と理論式

($\alpha_{\text{WAL-ILP}} \approx \sqrt{e\hbar^3 B_{\text{min}}} / m^* (\times 10^{-12} \text{ eVm})$) からこれら2DHG試料のスピンの軌道結合係数 α を決定できた(後述表1)。

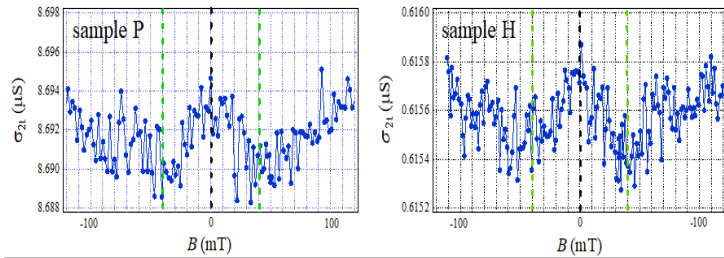
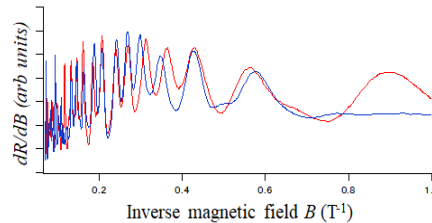
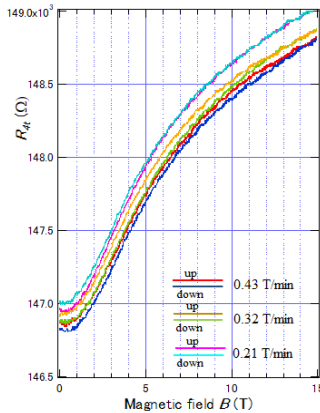
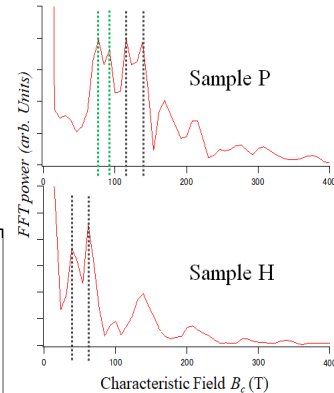


図2-2 試料P, Hに対するWAL信号。磁場に対し対称な極小値を与える磁場値($\sim 40 \text{ mT}$)から値が評価できる。



(左) 図2-4 試料Pの4端子抵抗 R_{4t} の磁場、及び掃引速度依存性。(上) 図2-5 R_{4t} 1階微分の $1/B$ プロット。up (赤) と down (青) でほぼ一致している。(右) それぞれの試料の R_{xx} ($1/B$ プロット) のフーリエ解析結果。



また図2-4は0~15Tの範囲で測定した4端子磁気抵抗であるが、少し不安定なbackground磁気抵抗に微小な振動が重畳した形となっている。この微小な振動を丁寧に解析した結果、これが2DHGのLandau subbandに起因したSdH(Shubnikov de-Haas)振動であることが確認出来た。それは、具体的にはSdH振動の磁場角度依存性(磁場が試料面に垂直方向から傾いていっても1階微分振動の主要な特徴が保持されていること)や周波数解析による電子密度評価により推定できた。図2-5に R_{4t} の1階微分信号 dR/dB 、2-6に周波数解析等の結果を示す。2-5では、広い磁場範囲で dR/dB が磁場の up/down sweep に対し良く再現している(微小振動は雑音ではない)ことが解る。2-6では、試料P, Hともそれらのフーリエ解析にピーク分裂が確認できている(縦線)。これらはRashba分裂に対応していると思われ、この分裂幅から $\alpha(\text{beat})$ が評価できる。

これらの解析から導かれる関連諸パラメータをまとめたものを表1に示す。まずホールシート濃度 n_s の値であるが、Hall測定の結果と低温のSdH振動のFFTから求めた結果は86%程度の差でよく一致している。なおカッコ内はスピン分裂した各ピーク(試料P, Hでそれぞれ4, 2本)に対応する n_s である。 α の値は2DEGと同程度であるが、スピンドバイス応用が有力視されている狭ギャップInGaAs材料系に比べると1/5程度とかなり小さい。スピン分裂 ΔE_R の大きさは約1/2である。文献調査はかなり丁寧に行ったが、これらの結果はGaN 2DHGに関する世界初の報告のようである。これは多分、これまでの2DHG試料では低温でのオーミック電極が高抵抗で精密磁気抵抗測定が難しかったことによると考えられる。 α については大きさよりもゲートによる制御性が重要であるが、現素子ではゲートが無いのではっきりしない。

表1 一連の解析により評価されたスピン軌道結合定数 とスピン分裂 ΔE_R

Material	In _{0.75} Ga _{0.25} As 2DEG	GaN 2DEG(E)	GaN 2DHG(P)	GaN 2DHG(H)
$n_s(\times 10^{13}/\text{cm}^2)$ (Hall) { $n_s(\times 10^{13}/\text{cm}^2)$ (FFT)}	6.4 $\times 10^{11}$	0.78 $\times 10^{12}$	1.3 { 1.1 ~(0.18+0.23)+ (0.28+0.36)}	0.32 { 0.29 ~(0.12+0.17)}
$\mu(\text{cm}^2/\text{Vsec})$ (Hall)	44,000	1,000	12	7
m^*/m_0 (文献値)	0.04	0.22	0.8	0.8
B_{min} (mT)	5	2	40	40
$\alpha_{WAL-ILP} (\times 10^{-12} \text{eVm})$	5.1	0.63	0.79	0.79
$\Delta E_R = 2\alpha_{WAL-ILP} k_F$ (meV)	2.0	0.88	0.8 - 1.0	0.7
$\alpha(\text{beat}) (\times 10^{-12} \text{eVm})$	7.6	3.9	3.0-3.2	3.5

以下に研究分担者による研究成果報告を要約して述べる。

【研究分担者：北陸先端科学技術大学院大学・赤堀准教授】

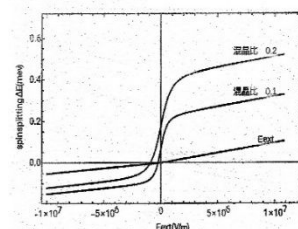
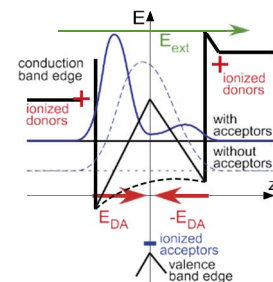
主にスピンデバイスの作製を分担し、以下の検討を行った。まず、任意パターンの形成法として、従来利用していた電子線リソグラフィー(EBL)ではなく、UVレーザーとデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)との組み合わせによるマスクレスリソグラフィーを利用し、スピンデバイスの作製を検討した。特に、本プロジェクトのスピンデバイスにおいて重要なパーツである強磁性体(FM)電極のパターン形成及びスパッタ・リフトオフ条件の確立と磁気特性の検討、さらにゲート電極との位置合わせの検討を進め、第1世代のデバイス作製を行った。デバイス作製工程は、順に、Ti/Au蒸着・リフトオフによるマーカー形成、ウェットエッチングによるメサ形成、AuGeNi蒸着・リフトオフによるオーミック電極形成、CoFeスパッタ・リフトオフによるFM電極形成、Al₂O₃の原子層堆積(ALD)によるゲート絶縁膜形成、ウェットエッチングによるコンタクトホール形成、Ti/Au蒸着・リフトオフによるゲート電極およびパッド形成である。第1世代のデバイス測定結果から、メサ端部でのFM電極やゲート電極の断線が疑われた。このため、特にメサ端部におけるデザインを改良し、第2世代のデバイス作製を行った。また、第2世代のデバイス作製では、FM電極直下の半導体との界面制御を目的として、ALDによるMgO挿入についても検討した。第2世代のデバイス測定結果から、本プロジェクトの範囲内で検討したMgO挿入は、スピンバルブ信号に対してネガティブに働いており、デバイス特性の向上には至らなかった。また、ゲートの効果に対して懐疑的な結果しか得られなかったため、ゲート電極のデザインを一部変更し、本プロジェクト終了に至るまでに第3世代までのデバイス作製を行った。

【研究分担者：北海道大学・土家准教授】

二層構造歪量子井戸におけるラシュバ有効磁場増強の研究

ラシュバ有効磁場は、半導体中の電子スピンを操作する手段として重要だが、これを有効に利用するためには出来る限り強いラシュバ有効磁場を発生させ、またその強度が容易に制御できることが重要である。先に我々は、量子井戸構造の井戸層中央と障壁層にそれぞれ高密度のアクセプタとドナーをドーピングし、イオン化したドナーとアクセプタ間に生じる強い内部電場を利用する提案を行った。しかし高密度のイオン化不純物ドーピングには、電子移動度を大きく低下させるという欠点がある。

本研究では、これを解決する手段としてピエゾ効果を用いることを提案した。井戸層を異なる半導体W1とW2による二層構造とし、井戸層の半導体をBとする。それぞれの格子定数aが $a_{W1} > a_B > a_{W2}$ の関係にある時、半導体W1は界面方向に圧縮され、半導体W2は引き伸ばされる。[111]方向に成長させた量子井戸では半導体W1とW2には互いに逆向きピエゾ電場が生じ、上図に似た形状のポテンシャルが形成されて上記と同様の現象が生じる。井戸層を厚さ19nmのGaAsと8nmのInP、障壁層をAlSb_xAs_{1-x}とした場合の電子スピン分裂の計算結果を図に示す。ラシュバ場は外部電場により急激に変化し、外部電場が比較的小さい領域では外部電場によるラシュバ場より2桁大きくなっている。



井戸層を厚さ19nmのGaAsと8nmのInP、障壁層をAlSb_xAs_{1-x}とした場合の電子スピン分裂の計算結果を図に示す。ラシュバ場は外部電場により急激に変化し、外部電場が比較的小さい領域では外部電場によるラシュバ場より2桁大きくなっている。

{感想・謝辞} 研究はおおむね順調に進んだが2点予定が大幅に狂った(コロナ禍が原因)。一つは北陸先端大でのデバイス試作の打合せやクリーンルーム作業への立会・協力・指導(新入生や留学生向け)が殆ど出来なかったことである。2つめは、所属機関では、全研究期間で外国出張が禁止され、国外国際会議に参加できなかったことである。得られた成果を国際的にアピール出来なかったのは残念なので、今後の英文論文執筆で埋め合わせをしたい。またGaN試料の提供と測定に協力頂いたパウデック(株)、物質材料研究機構、今中康貴研究員に感謝します。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田省二、藤元章、赤堀誠志
2. 発表標題 InGaAs 2次元電子ガス 2層デバイスのスピン依存伝導
3. 学会等名 日本物理学会 2022年第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田省二、藤元章、赤堀誠志
2. 発表標題 InGaAs 2次元電子ガス2層系のスピバルブ伝導
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田省二、藤元章、八木修一、成井啓修、山口栄一、今中康貴
2. 発表標題 GaN/AlGaIn 2次元電子ガスのスピン分裂
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田省二、藤元章、添田幸伸 赤堀誠志
2. 発表標題 CoFe-InGaAs複合系におけるスピバルブ伝導の磁場方位・ゲート電圧依存性
3. 学会等名 日本物理学会2021年第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田省二、藤元章、添田幸伸 赤堀誠志
2. 発表標題 ゲート付きCoFe-InGaAsスピナルバルブ素子における輸送解析
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
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
研究 分担者	赤堀 誠志 (Akabori Masashi) (50345667)	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 (13302)	
研究 分担者	土家 琢磨 (Tsuchiya Takuma) (40262597)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

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
---------	---------