

研究課題別評価

1 研究課題名：半導体ナノ構造体中に現れる新スピン物性の制御と応用

2 研究者氏名：古賀貴亮

3 研究の狙い：

電子は、電荷の自由度と共にスピンの自由度をもっています。これまでのエレクトロニクスでは、半導体中で電子の電荷自由度のみを利用して様々なデバイスを実現してきました。本研究では、これまでのエレクトロニクスでは利用されてこなかったスピンの自由度を利用した新しいデバイスを開発することを最終目標としました。私が本研究で特に注目したのが、半導体中の伝導電子スピンのゲートによる制御です。半導体中の電子スピン操作の方法としては、多くの研究では、希薄磁性半導体等の利用など、材料の磁氣的性質を用いるアプローチが行われていますが、本研究では、材料の磁氣的性質を利用せず、(ゲート電圧により制御可能な)電場により、非磁性半導体中の電子スピンを制御するというのが独創的な点です。このように、電子スピンを、磁場ではなく電場により制御できることは以前より提案されていましたが、本研究での理論、実験的研究を通して、そのような現象をより一層明確にし、定量的理解を深めることを目指しました。

電場によるスピン操作の具体的な方法は、Rashba 効果という現象を利用します。Rashba 効果というのは、半導体量子井戸のポテンシャル形状を非対称にすることによって、量子井戸中の2次元電子系にスピン軌道相互作用が働き、その結果、電子のエネルギー分散関係がスピン分離を起こす現象です。この現象以外に、電子エネルギーのスピン分離を起こさせる機構として系の結晶反転非対称性に起因する Dresselhaus のスピン軌道相互作用があるのですが、ここでは、その説明は省略します。Rashba 効果の結果、例えば、図1 (a) に示すような非対称なポテンシャル形状をもった量子井戸に閉じ込められた2次元電子ガスのエネルギー分散関係は、図2 (b) に示すようなスピン分離を起こします。有効質量近似を用いると、電子のエネルギー分散関係は、

$$E = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m^*} \pm \alpha k_{\parallel} \quad (1)$$

のように与えられます。ここで、 k_{\parallel} は量子井戸面内での電子の波数、 α は Rashba スピン軌道相互作用係数で、+、-の符号は、それぞれ、スピン上向き、スピン下向きの電子の分散関係を表します。実際の量子井戸中の電子のスピンは、量子井戸の面に平行、且つ、電子の波数ベクトル \mathbf{k} に垂直な方向を向いています。また、Rashba のスピン分離エネルギー D_R [図2 (b) 参照] は、 $2\alpha k_{\parallel}$ で与えられ、通常、フェルミ面上で定義されます。本研究で用いたサンプルの中で、ポテンシャルの形状が非対称な $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 量子井戸での、フェルミ・エネルギー E_F 、 α 、 D_R の典型的な値は、それぞれ、数十から百 meV、 $1-5 \times 10^{-12} \text{eV}\cdot\text{m}$ 、数 meV 程度です。一方、図1 (b) に示すような対称なポテンシャル形状を持つ量子井戸の場合、理想的には α の値を零にすることができ、

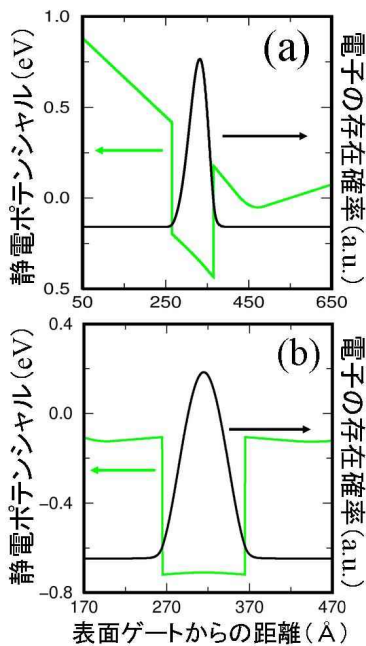


図1：量子井戸のポテンシャル形状
(a) 非対称な量子井戸
(b) 対称な量子井戸

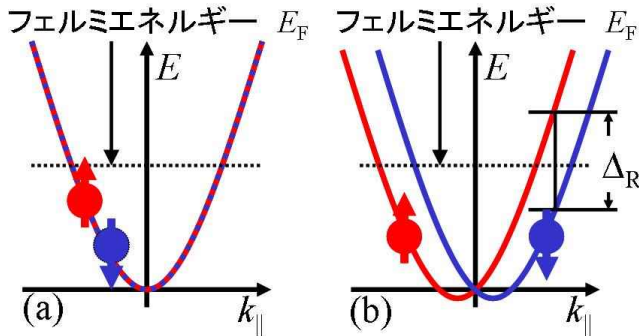


図2：2次元量子井戸での電子のエネルギー分散関係。(a) スピン縮退している場合。(b) Rashba 効果により、スピン縮退が解けた場合。

その場合、図2 (a) に示すように電子のエネルギー分散関係はスピン縮退します。実際の半導体量子井戸のサンプルにおいては、サンプルの表面に蒸着した金属ゲート電極と量子井戸の間にかかる電圧（ゲート電圧）により、量子井戸ポテンシャルの形状、ひいてはaの値が制御できると考えられます。これまで、a値を求める実験的手法として、シュブニコフ・ド・ハース (SdH) 振動のうねりの解析が主に用いられて

てきましたが、この方法では(1) 正確に零磁場でのスピン分離の値が求められない、(2) 解析方法にあいまいさが残る、(3) うねりの観察のされ方にかなりの任意性が存在する、等の理由によって、研究者の間では、この方法が零磁場スピン分離を測定する最良の方法であるとのコンセンサスは得られておらず、Rashba 効果の定量的理解はあまり進んでいません。本研究では、後に述べるように、低温、低磁場での磁気抵抗測定に観察される電子の反弱局在現象の解析を通し、a値を見積もります。また、その結果が、後で提案される正方形ループ配列でのスピン干渉実験の結果と矛盾がないことを確かめます。

本研究でのねらいを大きく2つに分けると、1. Rashba 効果の定量的理解、と 2. Rashba 効果を使ったスピン・デバイスの開発です。1の定量的理解に関しては、 $k \cdot p$ 摂動法に基づいた理論結果であるa値に関する次式を検証します。

$$\alpha = \langle \Psi | \frac{\hbar^2 E_p}{6m_0} \nabla \left(\frac{1}{E_F - E_{\Gamma_7}(z)} - \frac{1}{E_F - E_{\Gamma_8}(z)} \right) \Psi \rangle \quad (2)$$

ここで、 Ψ は量子井戸に垂直方向の電子の波動関数、 E_p は $k(p)$ インターラクシオン・パラメータ、 E_{Γ_7} 、 E_{Γ_8} は、それぞれ、ブリルアン・ゾーン内G点での、価電子帯、スピン分離帯のエネルギーです。また、 Ψ に関しては、簡単のため、1電子、1バンドモデルのポアソン・シュレディンガー両方程式の自己無撞着解を採用しました。Rashba 効果の定量的理解の第一歩は、この式の与えるa値と実験によるa値を様々な量子井戸構造において比較し、(2) 式の

妥当性、適用限界についての知見を得ることです。また、上述2のデバイス開発のためにも1の定量的理解がある程度必要。一方、Rashba 効果の完全な定量的理解を待たずに、デバイス開発を(先回りして)進めることによって Rashba 効果の定量

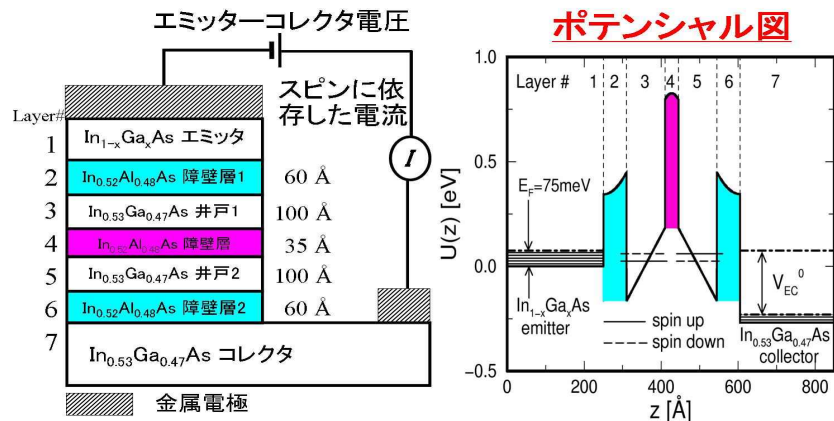


図3：3重障壁非磁性共鳴トンネル・スピン・フィルターの構造図(左)とポテンシャル図(右)。図の水色の層はn型に、桃色の層はp型にドーピングしてある。ドーピング濃度はそれぞれ、 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ と $1.37 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。

的理解が進むという副効果もあります。

具体的な研究の遂行に当たっては、次のような3つの研究サブ・テーマを設定しました：①100%スピン偏極非磁性スピン・フィルターの提案と実験的検証、②スピン制御用ヘテロ構造設計手法の確立、③量子人工ナノ構造中でのスピン輸送現象、スピン干渉現象、歳差運動の研究。以下に、それぞれの研究サブ・テーマでの研究のねらいを要約します。

①100%スピン偏極非磁性スピン・フィルターの提案と実験的検証

本研究で提案した「100%スピン偏極非磁性スピン・フィルター」の概略図を図3に示します。この提案では、Rashba 効果の大きい材料系で、適切にバンド・エンジニアリングを施した3重障壁共鳴トンネル・ダイオード (RTD) を作製することにより、フィルター効率ほぼ100%の非磁性半導体スピン・フィルターが実現可能であることが示されました (図4参照)

[T. Koga et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 126601 (2002)]. 本研究では、この提案の実験的検証を目指しましたが、提案したポテンシャル形状 (図3に示した“山”型のもの) を実現するには、RTD の障壁層への高濃度のドーピングが必要など、技術的な困難が伴い、実験的検証には課題を残しました。その一方で、本スピン・フィルターを改良して、ある特定の方向にスピン偏極した電子のみを取り出せるようにしたデバイスや、組成変調を利用してスピン・フィルターを実現する方法を発明し、特許審査請求中です [特開 2004-165426、特開 2004-165438]。

②スピン制御用ヘテロ構造設計手法の確立

本サブ・テーマでは、様々なスピン制御用ヘテロ構造の設計、作製を通して、(2) 式の妥当性、適用範囲についての知見を得ることをねらいとしました。具体的には(001)InP 基板に格子整合した $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ヘテロ構造系を取り上げ、次の3セットの実験を行いました。なお、実験に使用したサンプルは

全て有機金属化学蒸着法 (MOCVD 法) により成長しました。

(1) 量子井戸層の上下にキャリア供給層を設け (図7参照)、それぞれでの不純物濃度を調節することにより量子井戸のポテンシャル形状を制御し、その結果、a値がどう変化するか調べた。(サンプルセット1)

(2) 上述の量子井戸近傍のキャリア供給層での不純物濃度は固定し、基板/バッファ層境界に存在する不純物量を調整することにより、量子井戸近傍のドーピング・プロファイルによらずに、量子井戸中のポテンシャル形状を制御し、その結果、a値がどう変化するか調べた。(サンプルセット2)

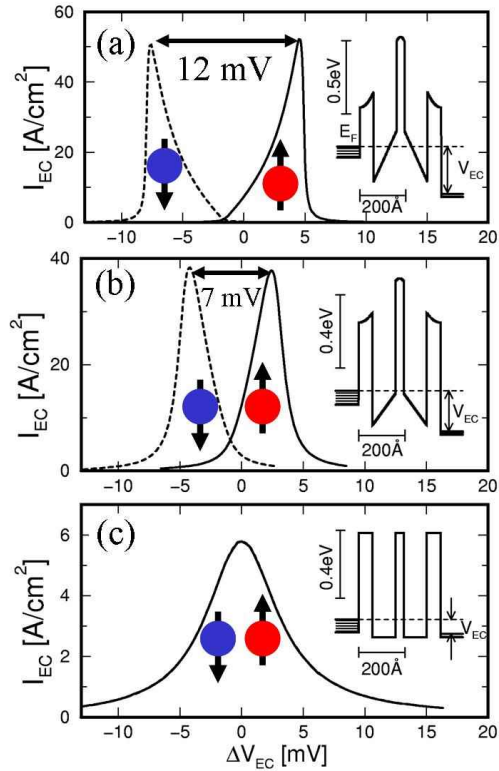


図4：3重障壁非磁性共鳴トンネル・スピン・フィルターの I - V 特性。(a)、(b)、(c) はそれぞれ、インセットに示すようなポテンシャル形状を仮定した場合の I - V 特性の計算結果。(c) のような平坦なポテンシャル形状では、Rashba 効果がなくなり、 I - V 特性にスピン分離が起きない。

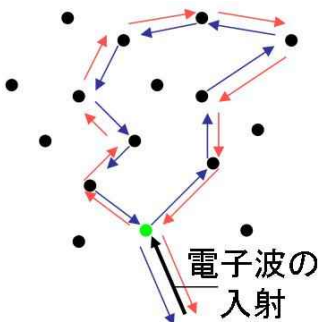


図5：ランダムな不純物による電子波局在の様子。

(3) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 量子井戸の障壁層の片側に薄い InP 層を導入し、 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 界面にみられる特異な価電子帯構造が a 値にどのような影響を与えるかを調べた。(サンプルセット3)

本サブ・テーマでは、一貫して、 a 値を実験的に見積もる手法として、電子の反弱局在現象の測定、解析を用いました。電子の反弱局在現象は、2つの連続した任意のスピンの回転操作が非可換な性質を持っていることが原因で、電子の弱局在効果が抑えられるという現象です。まず、電子の弱局在効果とは、図5に示すように、導体(ここでは半導体量子井戸)中に存在するランダムな不純物イオンの間で電子波が散乱を繰り返し、閉じたパス(経路)を形成し、そこに電子が局在するという現象です。この電子局在の機構は、次の2段階で説明できます。(1)例えば、図5に青色矢印で示したような電子波の閉じたパスが、たまたま形成されたとします。その場合、今、問題としている電子系では、ハミルトニアンが時間反転対称性をもっているため、青色のパスと時間反転対称の関係にある赤色のパスが、青色のパスが存在する確率と全く同じ確率で存在します。

(2) 電子は波としての性質を持っているので、青色のパスを通った電子波と赤色のパスを通った電子波は両者の終点(図5での緑色の点)で量子干渉を起しますが、その際、それぞれのパスで電子スピンの回転が伴わなければ、両電子波(波動関数)は必ず強め合う干渉を起します。これによって、後方散乱確率が増大し、電子の弱局在が起ります。ところで、この電子の弱局在は、量子井戸に垂直な磁場を印加することにより部分的に壊れます。その理由は、印加磁場を発生させるベクトル・ポテンシャルに起因した位相が電子波動関数に付け加わるのですが、青色のパスと赤色のパスの間で、その符号が逆になるからです。これらの結果、注目する量子井戸が弱局在の領域にあるときは、図6に黒線で示すように、低温(典型的には 0.3K 以下)での磁気抵抗が磁場 $B=0$ で極大を取ることが知られています。これに対して、電子の反弱局在効果が起きるのは、上で考慮したパスを電子波が通る際にスピンの回転(或いは反転)が伴う場合です。このスピンの回転(反転)を起す機構は、スピン軌道相互作用が一般的です。反弱局在効果は、実験的には、図6に赤線で示すように低温での磁気抵抗が $B=0$ で極小をとることに現れます。

本研究では、量子井戸の低温での磁気抵抗に見られる電子の反弱局在効果を、Rashba効果によるスピン分離を仮定したモデル [S. V. Iordanskii *et al.*, JETP Lett. **60**, 206 (1994)] を使って解析することにより a 値を見積りました。

③量子人工ナノ構造中でのスピン輸送現象、スピン干渉現象、歳差運動の研究

本サブ・テーマでは、Rashba効果の存在する半導体量子井戸中でスピンの歳差運動が起り、その結果、電子波のスピン干渉が起きることを、人工ナノ構造を使って実験的に検証することを目的としました。また、得られたスピン干渉の結果が、上記反弱局在解析で求めた a 値と矛盾しないことを確かめました。実際には、次節で述べる通り、電子波のスピン干渉効果を確認するための正方形型スピン干渉計の理論提案を行った後、それに基づいた原理検証実験を行いました。

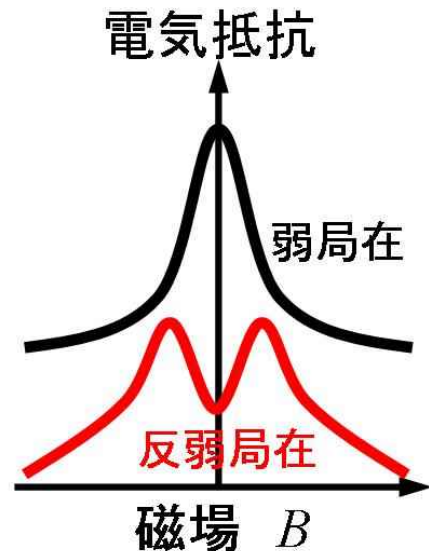


図6：低温での磁気抵抗に表れる、

4 研究成果 :

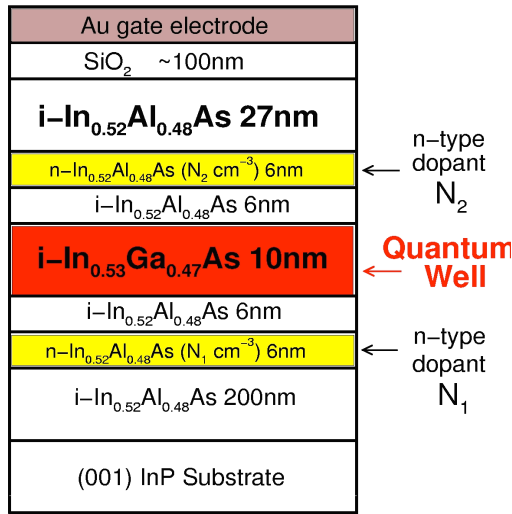


図7：サンプルセット1の量子井戸構造。(001)InP 基板のすぐ上の層が $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ バッファ層である。

表1：サンプルセット1におけるドーパント濃度

ウェハ名	N_1 [cm^{-3}]	N_2 [cm^{-3}]
Sample1	4×10^{18}	0
Sample2	3×10^{18}	1×10^{18}
Sample3	2×10^{18}	2×10^{18}
Sample4	1×10^{18}	3×10^{18}

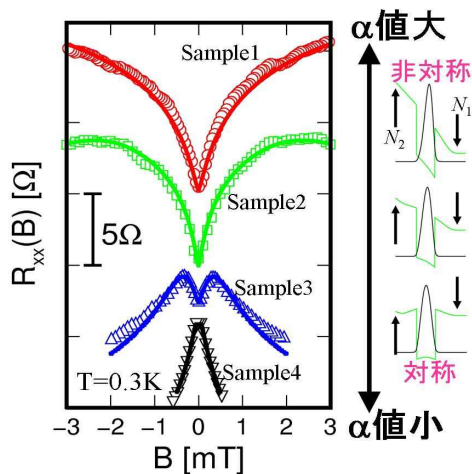


図8：サンプルセット1で観察された、弱局在→反弱局在転移。各エピ・ウェハで、素子のキャリア濃度 $7.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 程度、電気抵抗 $1.2\text{-}1.6\text{k}\Omega$ 程度になるようにゲート電圧を調節して測定。

①100%スピン偏極非磁性スピン・フィルターの提案と実験的検証

本サブ・テーマでの研究成果は、前述の3重障壁共鳴トンネル・スピン・フィルターを改良して、ある特定の方向にスピン偏極した電子のみを取り出せるようにしたデバイス（完全偏極スピン・フィルター）や、組成変調を利用してスピン・フィルターを実現する方法を発明し、特許審査請求中です [特開 2004-165426、特開 2004-165438]。前述の非磁性半導体スピン・フィルターでは、フィルター後の電子のスピンは、電子の進む方向（波数ベクトルの方向）に垂直、且つ、ヘテロ界面に平行な方向に偏極していますが、フィルター後の電子には様々な方向の波数ベクトルを持ったものが含まれているので、それらの電子は、ある特定の軸に対しては、ネットではスピン偏極していません。そこで、「完全偏極スピン・フィルター」では、電子線リソグラフィ法等で作製した人工ナノ構造を使って特定の波数ベクトルを持った電子のみを取り出すことによって、ある特定の軸に対してネットではスピン偏極した電子を取り出す方法を発明しました。これが、実現すれば、スピン偏極電流源として、スピンFETや、スピン量子ビットの書き込みデバイス等への応用の道が開かれます。また、組成変調を利用したスピン・フィルターでは、障壁層に不純物をドーピングすることなくスピン・フィルターを実現する方法を発明しました。

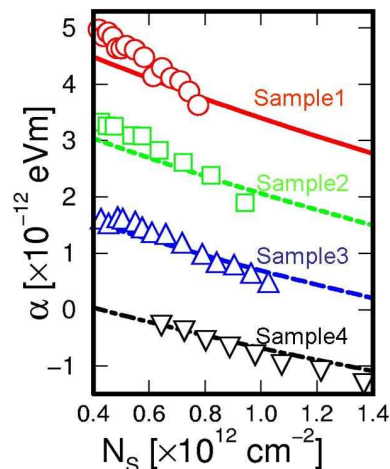


図9：サンプルセット1の各エピ・ウェハについて反弱局在解析から求められた α 値（各シンボル）と（2）式を使った理論計算値（各曲線）との比較。

②スピン制御用ヘテロ構造設計手法の確立

上述のサンプルセット1の構造を図7に示します。ウェハは4枚成長し、それぞれのドーピング濃度は表1に示す通りです。本サンプルセットでは、量子井戸ポテンシャルの非対称性を制御することによる弱局在一反弱局在転移が、世界で初めて観察されました(図8) [Koga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 046801 (2002)]。また、解析の結果得られた α 値は、k-p法に基づいた理論値 [(2)式] と定量的な一致を示しました(図9)。このことにより、これらのエピ・ウェハでは、量子井戸ポテンシャルの形状が、設計どおりに正確に制御されているということが出来ます。

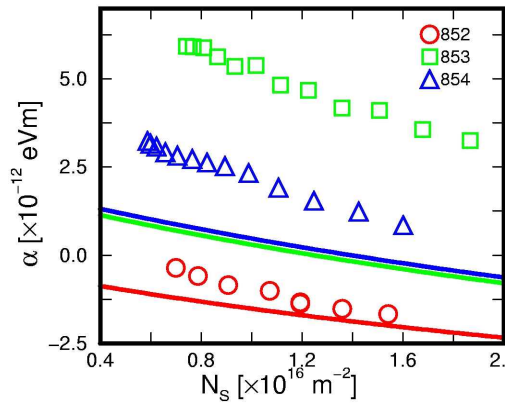


図10: サンプルセット2の各エピ・ウェハについて反弱局在解析から求められた α 値(各シンボル)と(2)式を使った理論計算値(各シンボルと同色の曲線)との比較。

が α 値に反映されるはずですが、図10に示す通り、これらのウェハ(852、854)については、反弱局在解析から求めた α 値は(2)式による計算値と定性的に一致しました。実験値と計算値の定量的な食い違いの原因として考えられるのは、結晶成長中に意図せずに取り込まれたバックグラウンド・インピュリティーの存在で、バッファ層に 10^{17}cm^{-3} 程度のn型の不純物があると仮定すると、 α の理論値と計算値は非常によい一致を示しましたが、これは、バックグラウンド・インピュリティーの存在を無視することのできたサンプルセット1の結果とは矛盾します。ウェハ853に関しては、 α の実験値は定性的にも計算値と一致せず、その原因究明は今後の課題です。

表2: サンプルセット2におけるドーパント濃度

ウェハ名	$N_1 [\text{cm}^{-3}]$	$N_2 [\text{cm}^{-3}]$	Chem. Pot. [#]
852	1×10^{18}	3×10^{18}	価電子帯端
853	2.5×10^{18}	1.5×10^{18}	価電子帯端
854	1×10^{18}	3×10^{18}	伝導帯端

[#]基板/バッファ層界面でのフェルミエネルギーの位置。

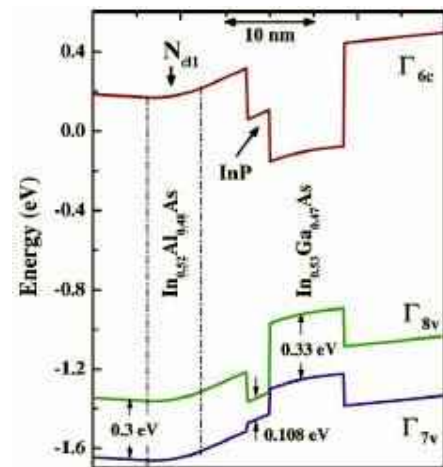


図11: $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ ヘテロ構造のバンド・アラインメント図。

表3：サンプルセット3の層構造とドーパント濃度
[一番下が(001)InP 基板の上に成長したバッファ層]

ウェハ名⇒	No.1	No.2	No.3	No.4
<i>i</i> -In _{0.52} Al _{0.48} As	250	360	250	370
<i>n</i> -In _{0.52} Al _{0.48} As ^(a)	60	-	60	-
<i>i</i> -In _{0.52} Al _{0.48} As	50	-	60	-
<i>i</i> -InP	25	25	-	-
<i>i</i> -In _{0.53} Ga _{0.47} As	85	85	100	100
<i>i</i> -In _{0.52} Al _{0.48} As	-	60	-	60
<i>n</i> -In _{0.52} Al _{0.48} As ^(b)	-	60	-	60
<i>i</i> -In _{0.52} Al _{0.48} As	2120	2000	2120	2000

(a) $N_{d1}=2.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, (b) $N_{d2}=2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

このサンプルセットに関しても、エピウェハ No.2、No.3 では、 α の実験値と理論値の間である程度の一致が見られるのですが、エピウェハ No.1、No.4 に関しては、 α の実験値と理論値は定量的には一致していません。ただ、エピウェハ No.1 と No.3、No.2 と No.4 の実験結果をそれぞれ比較してみると、No.1 と No.3 の比較では、InP 層の挿入によって α 値が上昇する現象、エピウェハ No.2 と No.4 の比較では、InP 層の挿入によって α 値が減少する現象が観察されます。これは、(2)式による理論予測と一致する現象なのですが、その上昇幅や減少幅は、定量的には理論計算値とは一致しませんでした。

③量子人工ナノ構造中のスピン輸送現象、スピン干渉現象、歳差運動の研究

本研究サブ・テーマでは、まず、半導体ナノ構造中で起きると予想されるスピン

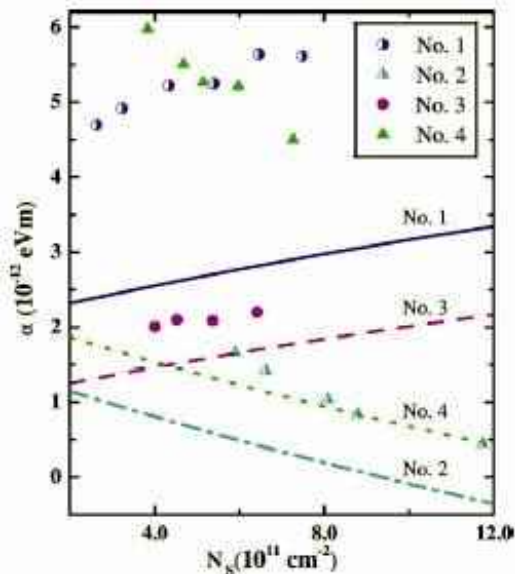


図12：サンプルセット3の各エピ・ウェハについて反弱局在解析から求められた α 値(各シンボル)と(2)式を使った理論計算値(各シンボルと同色の曲線)との比較。

サンプルセット3では、InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 界面にみられる特異な価電子帯構造(図11)が α 値にどのような影響を与えるかを調べるために、ドーピング・プロファイルを一定に保ったまま、In_{0.53}Ga_{0.47}As 量子井戸の障壁層の片側が InP である量子井戸と、両側とも In_{0.52}Al_{0.48}As である量子井戸とを作製し、それぞれのエピ・ウェハでの α 値を弱局在解析から調べました。これらの実験に用いたエピ・ウェハの層構造を表3にまとめます。得られた実験結果と(2)式を用いた理論計算の結果を図12に示します。

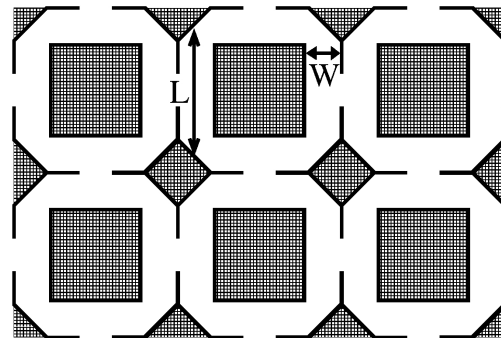


図13：スピン干渉現象測定のための人工ナノ構造。

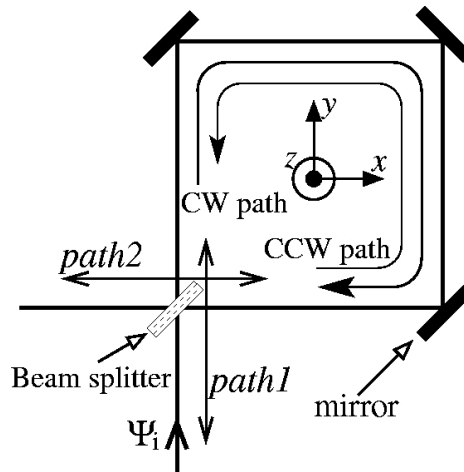


図14：正方形スピン干渉計の模式図。

干渉の効果について考察しました。想定するナノ構造は、図13に示したもので、2次元量子井戸構造を持った半導体エピウェハ上に作製します。ここで、白い部分には2次元電子ガスが存在し、メッシュや黒い部分は、電子線リソグラフィ等によって、2次元電子ガスが存在できなくした部分を表します。白い部分のチャンネル幅 (W) は $0.5 \mu\text{m}$ 程度、長さ (L) は $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度で、低温での電子の平均自由行程を l とすると、 $W < l$ 、 $L \sim l$ が成り立ちます。このような構造の中で起きるスピン干渉効果を考察するための単純化したモデルを図14に示し、これを正方形型スピン干渉計と呼びます。このモデルでは、波動関数 Y_i の電子が、経路 path1 に沿って、スピン干渉計に入射します。波動関数 Y_i は、ビーム・スプリッター (Beam splitter) によって、 Y^{CW} と Y^{CCW} (部分波) に分けられ、それぞれは3つの鏡 (mirror) で定められた正方形の経路を、時計回りと反時計回りで進みます。これらの部分波は、再びビーム・スプリッターを通過してスピン干渉計の外に出るのですが、その際に部分波間での量子干渉が起きます。その結果、電子が path1 に出てくる確率 (電子が path1 から入射して path1 へ戻される確率なので、これを後方散乱確率と呼びます) は、

$$P_{\text{back}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} (\cos^4 \theta + 4 \cos \theta \sin^2 \theta + \cos 2\theta) \cos \phi \equiv \frac{1}{2} + A(\theta) \cos \phi \quad (3)$$

で与えられることが簡単な計算からわかります [論文2]。ここで、 f は、ベクトル・ポテンシャルに起因する波動関数の位相で、図14の z 方向にかけられた磁場 B を使って、 $f = 2eBL^2/\hbar$ で与えられます。 q は、正方形ループ角辺を電子が通る時に起きる、Rashba 効果によるスピン歳差運動の回転角で、 $q = 2am^*L/\hbar^2$ で与えられます。実際の実験では、このような電子波の干渉効果は、図15(b)のような、真中に図13に示すようなナノ構造 [図15(a)の電子顕微鏡写真も併せて参照] が作りこんであるホール・バーの縦抵抗 R_{xx} に反映されます。例えば、(3) 式の $\cos f$ は、縦抵抗 R_{xx} が磁場 B の関数として振動するというを示しています。これは、アハラノフ・ボーム (AB) 効果の一種として知られる、

Al'tshuler-Aronov-Spivak (AAS) 振動です。(3) 式は、さらに、観察される AAS 振動の振幅は、 $A(q)$ によって、変調されることを示しています。これが、スピン干渉の効果で、 $A(q)$ の値を詳細に調べてみると、 $q = 0.4245\pi, 0.822\pi, 1.178\pi, 1.5755\pi$ で、 $A(q) = 0$ になることがわかります。つまり、実験により、AAS 振動をゲート電圧の関数として測定すると、これらの q 値を与えるゲート電圧で、観測される AAS 振動の振幅が零となるはずですが、また、逆に、そのような現象を確認できれば、それらのゲート電圧での α 値が、 $\alpha = q^2/2m^*L$ によって (q に上の値を代入) 求まることとなります。

正方形型スピン干渉実験は、上記サブ・テーマ②でのサンプルセット1を用い、フォトリソグラフィ法及び電子線リソグラフィ法により、図15に示すような Hall bar 素子を作製することによって行いました。ここでナノ構造が、単一の正方形ループではなく多数のループが配

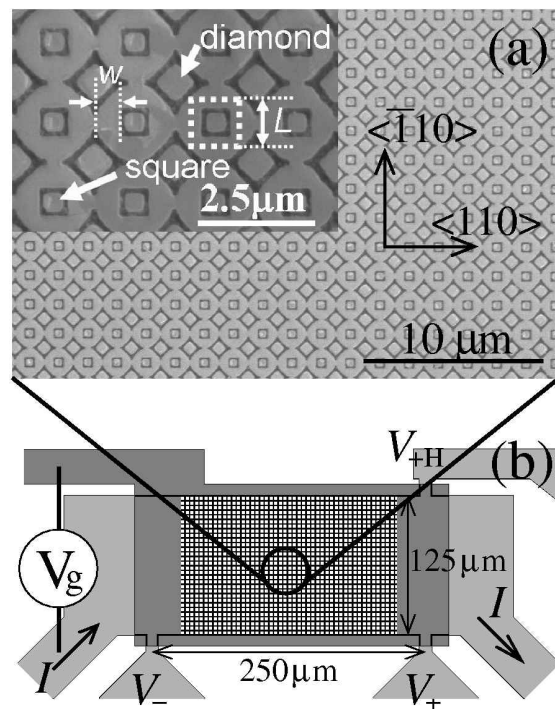


図15：正方形型スピン干渉計の原理検証実

列状に並んだものであるのは、通常の AB 効果（磁気抵抗が e/h の周期で振動）や普遍的コンダクタンス揺らぎの効果を経験的に平均化して、AAS 振動をより明瞭に観察するための工夫です。また、この素子には、Hall bar 全体を覆うようなゲート電極が蒸着されており、その下の 2次元電子ガスの濃度と Rashba パラメータ α の値をゲート電圧により制御できます。図 16 に、このような素子の低温 (0.3 K) での磁気抵抗測定の結果の一例をプロットします。ここでは、sample2 のウェハを用い、正方形ループのサイズが $L=1.5\mu\text{m}$, $W=0.5\mu\text{m}$ の素子を用いました。ゲート電圧 (V_g) を 0.0V から、4.0V まで上げていくに連れて、AAS 振動の振幅が変化する様子が明瞭に観察されました。図 16 で、 $V_g=0.3, 0.9, 3.1\text{V}$ 付近で AAS 振動の位相が π 変化している（つまり、 $A(q)$ の符号が反転している）ことがわかり、詳細な検討の結果、これらのゲート電圧での q 値は、それぞれ、 1.178p , 0.822p , 0.4245p に対応していることがわかりました。よって、 $a=q_{\perp}^2/2m^*L$ の関係式から、これらのゲート電圧での α の値が求まることになります。

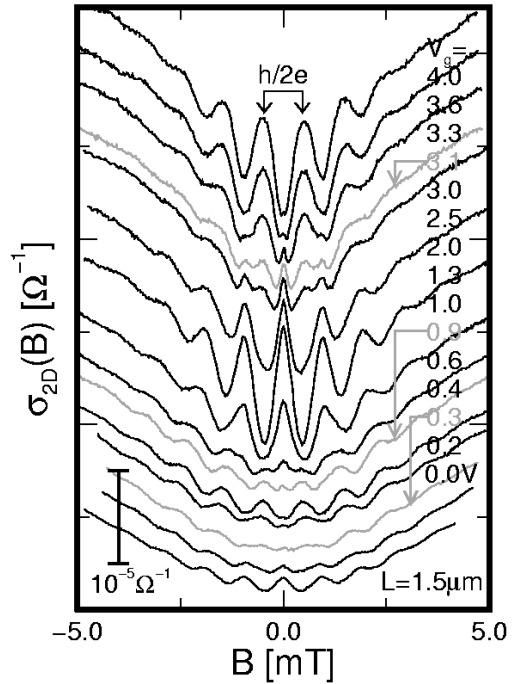


図 16 : 観察された AAS 振動のゲート電圧依存。測定に用いた素子は、エビウェハ sample2 (サンプルセット 1) を使用し、 $L=1.5\mu\text{m}$, $W=0.5\mu\text{m}$ の条件で作製された。(測定結果は、比較しやすくするため、上下にシフトしてある。)

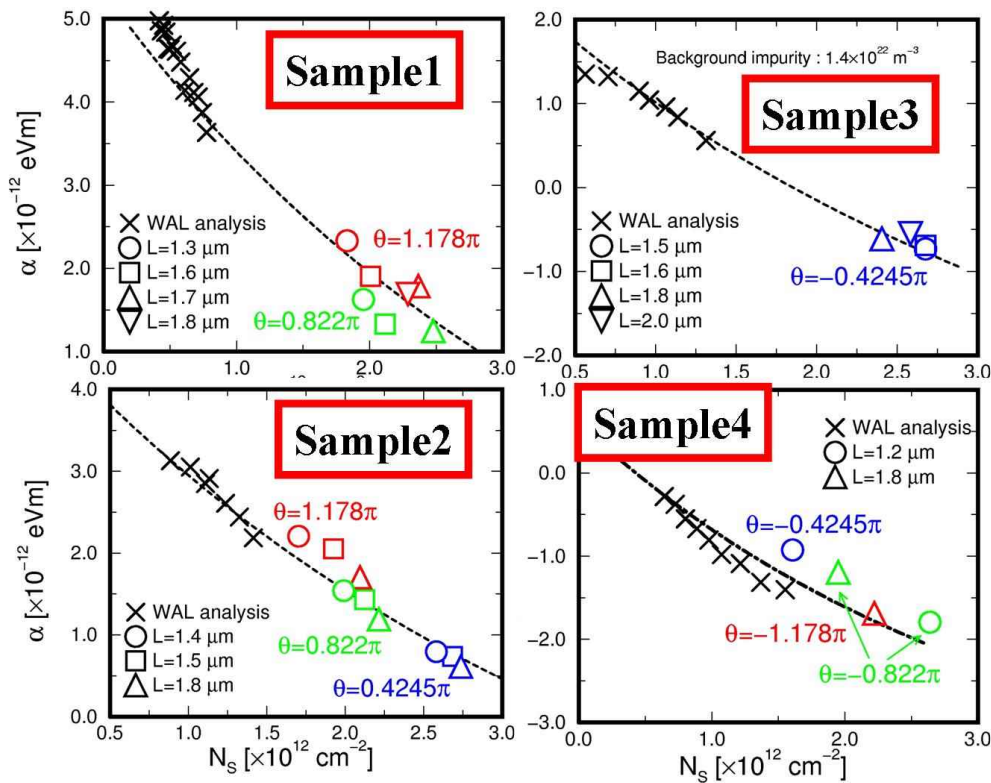


図 17 : サンプルセット 1 の各エビウェハの α 値。×印は反弱局在解析から見積もった α 値、曲線は $k \cdot p$ 摂動法による理論計算値、その他のシンボルは、正方形ループ配列におけるスピン干渉現象の解析から得られた値。Sample2, 3 の理論計算値は、それぞれ、 $4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, $1.4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ の n 型のバックグランド不純物の存在を仮定している。

図17に示すのは、このようにして、正方形ループ配列にみられる AAS 振動の振幅のゲート電圧依存を解析して得られる α 値を、サンプルセット1の全てのウェハに関して求め、前述の反弱局在解析によって求めた α 値と(2)式による理論計算値とともにキャリア濃度の関数としてプロットしたものです。このように、これら3つの方法による α 値は非常に良い一致を示すことがわかりました。

5 自己評価：

さきがけ研究期間で得られた成果が、当初の目標に対してどのように位置づけられるかを各研究サブ・テーマごとに次にまとめます。

① 100%スピン偏極非磁性スピン・フィルターの提案と実験的検証

本研究サブ・テーマに関しては、さきがけ研究申請時に Rashba 効果と共鳴トンネル・ダイオードを組み合わせるとスピン・フィルターができるのではないかと漠然としたアイデアがあり、予備的な理論計算を行っていました。その後、さきがけ研究が採択されるまでの間に、理論計算を洗練し、学術誌への論文投稿も行いました。さきがけ研究での当初の目標は、スピン・フィルターを実際に作製し、実験検証を行うことでした。結果としては、本スピン・フィルターの実験的検証は、さきがけ研究期間内に行うことはできませんでした。今後は、InAs 量子井戸など Rashba 係数のより大きな材料を使い、共鳴トンネル構造中の障壁層に不純物をドーブしない構造で、原理的にスピン・フィルター実現が可能か検討した後、実験的検証に進む予定です。

② スピン制御用ヘテロ構造設計手法の確立

本研究サブ・テーマに関しては、ほぼ、当初の目標通りの成果を得ることができました。「量子井戸のポテンシャル形状の制御により、Rashba 係数 α の値を定量的に制御できるか？」の問いに、ある程度の答えを与えることができたと考えます。結果として、改めて、 α 値の制御の難しさを思い知ることになりましたが、今後も、地道な努力を積み重ねていくことが重要と考えます。

③ 量子人工ナノ構造中でのスピン輸送現象、スピン干渉現象、歳差運動の研究

本研究サブ・テーマに関しては、当初の目標以上の成果を得ることができました。さきがけ研究申請時に持っていたアイデアは、「In_{0.53}Ga_{0.47}As 量子井戸など、ゲート電圧によりスピン分離が制御できる2次元電子系で量子人工ナノ構造を作り、そこでの電子波の干渉現象のゲート電圧依存を調べる等すると、電子のスピン自由度に基づいた特異な干渉効果を観察できるのではないかと」といった、漠然としたものでした。その後、さきがけ研究期間中に、正方形型スピン干渉計の簡単なモデルを立てて計算を行ったところ、スピン干渉の効果は予想以上に大きく、電子線リソグラフィなどで In_{0.53}Ga_{0.47}As 量子井戸上に書き込んだ正方形ループ配列構造で見られる AAS 振動の振幅がゲート電圧の関数として振動することが予想されました。その後、この提案の実験的検証にも成功しました。その際、非常に役に立ったのが、②のサブ・テーマにおいて蓄積していた、In_{0.53}Ga_{0.47}As 量子井戸のポテンシャル形状と Rashba 係数 α についての知見であると考えます。

6 研究総括の見解：

通常、半導体中の電子輸送はスピン状態に依存しないが、スピン軌道相互作用が存在するために非対称な量子井戸ポテンシャルの中の電子はスピン配向によって異なるエネルギーを持つ。このことを利用すれば特定のスピンのみを有する電子流を作り、制御できる可能性がある。一般にスピン固有状態はコヒーレンス時間が長いことから、これを利用した量子情報デバイスの実現が期待されるが、スピン軌道相互作用の制御性については判っていないことが多い。本研究ではスピンに依存したエネルギーシフトを生み出す Rashba スピン軌道相互作用項の定量的理解を目指して一連の理論的、実験的研究を行った。2次元電

子ガス密度を精密に制御した実験で相互作用係数を正確に評価できた。また、この現象を利用して構築可能なスピン電子デバイスを考案し、特許出願によって知的所有権が主張できるようにした。さらに、微細加工によって作成した正方形リング構造スピン干渉計デバイスを用いて右回りと左回りの電子流間の位相差を外部磁場で制御し、アハラノフ・ボーム効果の一種であるアルトシューラー・アロノフス・ピヴァク（AAS）振動を観測することに成功した。

これらは Physical Review 誌 2 篇を含む学術論文 6 編、国際会議プロシーディングス論文 2 篇、国際会議口頭発表 5 件などに公表されている。化合物半導体低次元構造および微細加工法を用いた先端的なナノ構造デバイス技術により、スピントロニクス基礎となる物理現象を明確な形でモデル化することに成功しており、当分野の進歩への貢献は大きい。研究計画で提案したスピンフィルタデバイスの実現は、予想以上の技術的困難のために実現に至っていないものの、全体としては期待以上の成果を挙げた研究と判断します。

7 主な論文等：

論文

- [1] Y. Lin, T. Koga, J. Nitta: "Effect of an InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As interface on spin-orbit interaction in In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As heterostructures", Phys. Rev. B **71**, 045328 (2005).
- [2] T. Koga, J. Nitta and M. van Veenhuizen: "Ballistic spin interferometer using the Rashba effect", Phys. Rev. B **70**, 161302(R) P1-4 (2004).
- [3] T. Koga, J. Nitta and S. Marcet: "Structural Control of Rashba Spin-Orbit Coupling in In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As Quantum Wells", Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism **16**, P331-334 (2003).
- [4] T. Koga, J. Nitta and S. Marcet: "Effect of doping at the substrate/buffer layer interface on the Rashba coefficient a in In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As asymmetric quantum wells", TOWARD THE CONTROLLABLE QUANTUM STATES, Proceedings of the International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics (MS+S2002), Edited by H. Takayanagi and J. Nitta, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., P73-79 (2003).

特許

[1]発明者：古賀貴亮、新田淳作

発明の名称：スピンフィルタ装置

出願人：科学技術振興機構（85%）、日本電信電話株式会社（15%）

公開番号（公開日）：特開 2004-165426（平成 16 年 6 月 10 日）

出願番号（出願日）：特願 2002-329500（平成 14 年 11 月 13 日）

[2]発明者：古賀貴亮、新田淳作

発明の名称：スピンフィルタ

出願人：科学技術振興機構（85%）、日本電信電話株式会社（15%）

公開番号（公開日）：特開 2004-165438（平成 16 年 6 月 10 日）

出願番号（出願日）：特願 2002-329648（平成 14 年 11 月 13 日）

[3]発明者：古賀貴亮、渡辺正裕

発明の名称：超格子熱電材料

出願人：科学技術振興機構

公開番号（公開日）：特開 2002-193200（平成 16 年 7 月 8 日）

出願番号（出願日）：特願 2002-356574（平成 14 年 12 月 9 日）

受賞

N T T 物性科学基礎研究所所長表彰業績賞

「ゲートを用いた半導体中のスピン制御」古賀貴亮、新田淳作、関根佳明

平成16年3月22日