

学位論文題名

Spin-orbit interactions in InAs-based heterostructures

(InAs 系 HEMT 構造におけるスピン軌道相互作用)

学位論文内容の要旨

これまで情報処理や通信に使用される電子素子、回路の性能向上は専らそれらの微細化、高集積化によって行われてきた。過去数十年で開発された回路の集積化技術(デジタル・アナログ混載回路、System on Chip (SoC), System in Package (SiP) など)は現在我々の身の回りで使用される電気製品の小型化、高機能化に大きな進展をもたらした。一方、回路内の各素子の微細化はここ十年で非常に困難となってきており、微細化の目安であるムーアの法則への今後の追従が危ぶまれている。特に、ゲート長 10nm 程度以下の MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) の製作可能性が近年大きな議論の的となっている。このような将来的な技術的問題の他に、既に微細 MOSFET のトランジスタとしての動作の限界が取りざたされている。現在はチャンネル材料やゲート材料の変更、トランジスタの 3 次元構造化による対処が検討されているが、更なる微細化が進んだ場合、トランジスタの動作原理の抜本的な変更が望まれる。特に近年は、高機能化や高速度化の観点からだけでなく、低消費電力化の面からも動作原理の見直しが必須となっている。

CMOS (Complementary MOSFET) の代替として、これまで超伝導デバイス、メゾスコピックデバイス、単電子デバイスなどが研究されてきたが、動作温度や電流駆動能力、電源の設計といった既存の回路との親和性も含めた解決には至っていない。このような状況の中で、電子のスピン自由度を情報処理に使用するスピントロニクスが注目されている。スピンによる情報処理として本研究では古典的な電流変調の効率化を焦点とし、半導体ヘテロ構造中のスピン軌道相互作用(SOI)を使った電子スピン制御について研究した。スピンドバイスにおいて電流は、ドレイン端でのスピンの位相によって変調される。これはメゾスコピック系における電子波干渉と似た原理であるが、電子波は運動量散乱やエネルギー散乱に対して非常に敏感なのに対し、スピンはそれらの散乱によって必ずしも緩和するわけではないため、散乱に強いあるいは動作温度が上げられる事が大きな特徴である。また、電流駆動能力、電源の設計に大きな変更を要しない事と合わせてスピントロニクスの大きな魅力となっている。

スピンは本来磁場に関する物理量であるが、SOI によって電場によって制御出来る事が知られている。特に半導体ヘテロ構造中ではゲート変調出来る Rashba 効果と出来ない Dresselhaus 効果の二種類がある。これらは大きいほどゲート電圧によるスピンの制御性が高い。また、これらが等しい大きさの場合 Persistent Spin Helix (PSH) と呼ばれる軌道運動(運動量散乱)とスピン運動が完全に分離した状態が現れる事が知られている。本研究では、狭ギャップ半導体であるため Rashba 効果と Dresselhaus 効果の両方が大きく、さらに近い $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.81-1$) に着目し、極低温における評価とヘテロ構造の適切な設計、歪み変調によるそれらのさらなる増大を試みた。

本論文は第1章から第7章までで構成されている。

第1章では本研究の背景、目的について述べたうえで、本論文の構成を記した。第2章では、SOIの定式化に関する理論背景について概観した。物理的な解釈を容易にするため、k.p法、有効質量近似、包絡線近似に基づき、電子状態を記述するSchrodinger方程式の階層的な構造を示す事に特に重点が置かれた。Rashba効果とDresselhaus効果は、各階層での空間反転対称性による伝導体と価電子帯のバンド間相互作用として自然に導入される。第3章では、特にRashba効果の研究の歴史を振り返り、ヘテロ界面の影響について考察した。まず、Rashba効果は本質的にはバンド間相互作用であり伝導体上の電子に作用する価電子帯上の電場は数学的表記にすぎない事を示した。また、そもそも価電子帯上の電場の概念が表れる原因となった、伝導体上の電場の消失についても反証を示した。第4章では、次章以降で行われる実際の実験方法について説明を行った。極低温における、高磁場および低磁場での磁気抵抗効果であるShubnikov-de Haas (SdH) 振動と反弱局在についても解説した。

第5章では、非対称なヘテロ構造をSdH振動と反弱局在により測定した結果についてまとめた。使用した試料は、InP(100)基板上に成長した、複合チャンネルを有するInGaAs/InAlAs HEMT (High Electron Mobility Transistor) であり、InGaAsサブチャンネル中に $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.9-1$) メインチャンネルが挿入されている。これらの構造では、表面側のドーピングによる極端なバンド曲がりにより、電子の波動関数のピークが表面側サブチャンネルとメインチャンネル間の境界上に存在する。これにより、これらの構造では境界のRashba効果への影響が直接観測されると期待される。正のゲート電圧領域でのSdH振動の測定から、これらの構造ではRashba係数が $50 \times 10^{-12} \text{eVm}$ から $70 \times 10^{-12} \text{eVm}$ と、従来同じ材料系で報告されてきた値のほぼ倍の値が得られた。境界の効果も考慮したk.p法による計算で、実際これらの構造では境界でのRashba係数が極端に高くそれによって大きなRashba効果が得られた事を確認した。これは理想的には境界上で発生している電場が無限大である事から納得出来る。また、他に境界による効果である事を示す点として、得られたRashba係数が負である事が確認された。負のゲート電圧領域では反弱局在の測定を試みた。低いゲート電圧領域では弱局在および反弱局在の両方が観測されず、-0.4V付近から弱局在が観測された。弱局在は-0.7V付近から反弱局在へと変化した。低いゲート電圧領域では、非常に強いRashba効果によって弱局在と反弱局在の両方が抑制され、中間領域ではRashba係数の符号変化に伴うPSHの実現により弱局在が観測されたものと解釈出来る。反弱局在領域でRashba係数等の算出を試みたが、十分拡散領域に入っていなかったため既存の理論によるフィッティングが行えなかった。第6章ではRashba効果の小さい対称な構造を使用し、歪みによるDresselhaus効果の変調を試みた。試料構造はメインチャンネルが $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}$ である事と、表面側と基板側の両方にドーピングしてある事以外は前章のものと同一である。格子不整合によるメインチャンネル内面内圧縮歪みを外部からの引張り歪みによって変調した。いずれの条件においてもSdH振動はうなりを示さなかったが、外部歪みによるDresselhaus効果の減少を示唆する結果が得られた。

以上より、適切なヘテロ構造の設計によるRashba効果の増大と、歪みによるDresselhaus効果の変調の可能性を示せた。これら結論は第7章にまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 陽 完 治
副 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 教 授 末 岡 和 久

学 位 論 文 題 名

Spin-orbit interactions in InAs-based heterostructures

(InAs 系 HEMT 構造におけるスピン軌道相互作用)

近年電子のスピン自由度を情報処理に使用するスピントロニクスに関する研究が盛んにおこなわれている。しかしその多くは MR 素子に代表されるような強磁性金属と常磁性金属の組み合わせや MRAM, またスピン注入トルクを用いるスピン RAM のような金属材料に依存するデバイス構造の研究を目的としており、半導体チャンネル中のスピンをゲートで制御する Datta-Das 型のスピントランジスタの研究は、いまだ数少なく、今後の発展が待たれている状況にある。チャンネル中のスピンの歳差運動をゲート電界によって制御し、電流のスイッチングを起こすにはミクロンオーダーの走行距離を必要とする。このようなスピントランジスタが高集積化に耐えるためには、より大きなスピン軌道相互作用が必要となる。本論文はこのような現況にある半導体ヘテロ構造中のスピン軌道相互作用 (SOI) を使った電子スピン制御について研究し、ヘテロ構造の適切な設計、歪み変調によるスピン軌道相互作用のさらなる増大を試みたものである。使用した試料は、InP(100) 基板上に成長した、複合チャンネルを有する InGaAs/InAlAs HEMT(High Electron Mobility Transistor) であり、InGaAs サブチャンネル中に $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(x=0.9-1)$ メインチャンネルが挿入されている。これらの構造では、電子の波動関数のピークが表面側サブチャンネルとメインチャンネル間のバンド不連続上に存在する。正のゲート電圧領域での SdH 振動の測定から、これらの構造では Rashba 係数が $50 \times 10^{-12} \text{eV}\cdot\text{m}$ から $70 \times 10^{-12} \text{eV}\cdot\text{m}$ と、従来同じ材料系で報告されてきた値のほぼ倍の値、またその Rashba 係数が負であることが得られた。これは、単なる量子井戸中の平均電界ではなく界面を含めたさまざまなヘテロ構造上がスピン軌道相互作用に与えているという議論を直接示すと同時に、材料系を変えずにバンドエンジニアリングによって大きなスピン軌道相互作用が得られるということを示した画期的な結果である。理論的にも寄与境界の効果も考慮した k.p 法による計算で、実際これらの構造では境界での Rashba 係数が極端に高くそれによって大きな Rashba 効果が得られた事を確認している。極低温、弱磁場中における反弱局在の測定を試み、低いゲート電圧領域では、非常に強い Rashba 効果によって弱局在と反弱局在の両方が抑制され、中間領域では Rashba 係数の符号変化に伴う PSH の実現により弱局在が観測されたものと解釈出来る結果を得ている。これらは SdH 振動の解析の結果を別の角度から裏付けるものである。

これを要するに、著者は、InAs 系 HEMT 構造においてヘテロ接合の構造非対称性およびバンド不

連続界面の適切な設計によりスピン軌道相互作用を制御できるという新知見を得たものであり、半導体中のスピン軌道相互作用の理解に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。