

研究報告書

「誘電体トランジスタを用いたスピン操作」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成25年3月

研究者: 中村 浩之

1. 研究のねらい

誘電体をチャネルとするトランジスタ構造を用いて、電子スピンを電界で操作する手法を構築する。誘電体としては KTaO_3 などスピン・軌道相互作用の大きい $5d$ 遷移金属化合物を使い、 Si など通常の半導体では実現できないスピン機能を得ることを狙いとする。具体的な目標として、電子スピンの方向をゲート電界によりナノメートルスケールで回転させることのできるスピン・トランジスタを作製する。

2. 研究成果

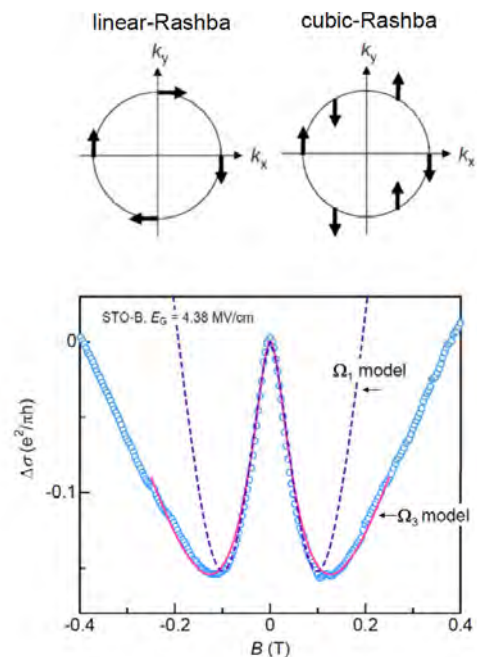
(1) 概要

本研究では、電子スピンを電場によって回転させる原理としてラシュバ効果を用いる。この効果は、電界効果トランジスタ (FET) 構造においてゲート電場を印加することにより実現できるため、既存のデバイスとの整合性が極めて高い。我々はまず遷移金属酸化物をチャネルとする FET 素子を、スピン回転の評価を再現性良く行える程度にまで高品質化することを目指した。次に、高品質の酸化物 FET 素子を用いて精密なスピン回転の測定・評価を行った。

(2) 詳細

研究テーマ A 「誘電体トランジスタの高品質キャリア注入電極の開発」

KTaO_3 をチャネルとする電界効果トランジスタ (FET) の測定は低温での歩留まりが低く困難であった。この問題を解決するために KTaO_3 基板の表面処理、及び FET のソース・ドレイン電極の改良を系統的に行った [文献 1, 2]。その結果、緩衝フッ酸水溶液による基板の表面処理を行うことによって室温付近での閾電場が再現性良く制御できること、 Al/Zn の二層からなるソース・ドレイン電極がデバイスの歩留まりを大きく向上させることを見出した。特に後者の電極構造は類似の酸化物である SrTiO_3 に対しても有効であり、この電極構造を採用することで後述するように精密な反局在効果の測定が可能になった。



(上図) 1次と3次の Rashba 効果における波数空間上の有効磁場配置。(下図) SrTiO_3 -FET の反局在効果解析 [文献3より]。

研究テーマB「ラッシュバ効果の観測と評価」

KTaO₃はゲート電界印加による大きなスピン回転機能（ラッシュバ効果）を有し、低温の磁気抵抗に現れる反局在効果の解析からはスピン回転長が20–60 nmと非常に短いことがさきあげ研究の開始時点で分かっていた。一方、伝導電子は軌道を占有し、かつゲート電場による量子閉じ込めの効果を考慮する必要がある複雑な系であり、ラッシュバ効果の詳細は明らかでなかった。我々は、KTaO₃と同じペロブスカイト型構造を有するSrTiO₃を用いて、反局在効果の測定および解析を行った。SrTiO₃はスピン軌道相互作用の強さが反局在効果の解析に適した領域にあり、KTaO₃よりも精密なラッシュバ効果の解析が可能である。解析に用いた理論は波数に関して1次と3次のラッシュバ項をいずれも含み、それぞれ、フェルミ円上で波数 k が一回転するとき有効磁場が1回転する場合と3回転する場合とに対応する。詳細な解析の結果、3次のラッシュバ項を想定したモデルが実験と極めて良く一致することを発見した[文献3]。

また、SrTiO₃、およびKTaO₃において、反局在効果の解析によるラッシュバ効果の定量的評価を行った。その結果、ラッシュバ効果の大きさを表すスピン分裂エネルギーはそれぞれ0.1–0.3 meV (SrTiO₃)、1–2 meV (KTaO₃)の範囲にあることが分かった。値が幅を持つのはゲート電場の大きさによって変調されるためである。単純に5d元素であるTaのもつスピン軌道相互作用を考えると、KTaO₃のスピン分裂エネルギーとしてはさらに大きい値が予想されたが、III–V族系のInAs等における値と同程度であった。このことから、KTaO₃で得られる20–60 nmという短いスピン回転長は、ラッシュバ効果の大きさそのものが巨大なわけではなく、電子有効質量が従来の半導体系と比較して大きいこと($m^* \sim 0.5$)がその主因であることが明らかとなった。スピンの回転長を短くするアプローチとして、「電子質量を重くする」ことの有効性を示した結果であるといえる。

3. 今後の展開

3次のラッシュバ効果は1次の効果と比べると、電子の運動方向と有効磁場の角度を任意に調整することが出来る点でスピン回転の設計自由度が大きい。今後、3次ラッシュバ効果の特徴を活用した高機能なスピン素子の提案・および開発に取り組んでいきたい。

また、スピン素子としての実証実験を行う観点では、偏極スピンの生成・注入の技術を構築することが重要である。ソース・ドレイン電極に強磁性体などスピン注入機能をもつ材料を利用した場合の研究をこれから進めていく予定である。

4. 自己評価

遷移金属化合物の強いスピン軌道相互作用を用いて、ナノスケールのスピン回転素子を作製することが本研究のねらいであった。SrTiO₃およびKTaO₃を用いたトランジスタにおいて短いスピン回転長が得られる物理的な起源を明らかに出来たこと、また3次のラッシュバ効果という特殊なスピン構造を観測できたことが研究期間内の大きな成果である。一方、研究期間内にスピン論理回路の作製までには至らなかった。今後、電子スピンを注入・検出する技術の構築が必要である。

5. 研究総括の見解

中村研究者は、誘電体に注入された電子スピンの方向をゲート電界によりナノメートルスケールで回転させることのできる Datta-Das 型のスピン・トランジスタを目指しました。

1990 年に Datta, Das によって提案されたスピン・トランジスタは、強磁性ソース電極から注入されたスピン偏極電子に対し、ゲート電界でラシュバ効果を通じてスピン軌道相互作用を変調し、スピンを回転させて電流を制御します。しかし、通常の半導体に対しては強磁性電極からのスピン偏極電子の注入効率が低く、さらにラシュバ効果によるスピン軌道相互作用の変調度も小さいため、スピンを 90 度回転させるために必要なチャンネル長(スピン回転長)が長くなることから、いまだに Datta Das デバイスは実現していません。

中村研究者は、さきがけ開始時点までの実験によって、KTaO₃ はゲート電界印加による大きなスピン回転機能(ラシュバ効果)を有し、低温の磁気抵抗に現れる反局在効果の解析からはスピン回転長が 20-60 nm と非常に短いことを明らかにしていました。まず、KTaO₃ の適切な表面処理と電極材料の選択により再現性のよい FET を実現しました。伝導電子は d 軌道を占有し、かつゲート電場による量子閉じ込めの効果を考慮する必要がある複雑な系であり、ラシュバ効果のメカニズムは明らかではありませんでした。中村研究者は、KTaO₃ と同じペロブスカイト型構造を有する SrTiO₃ を用いて、反局在効果の測定および解析を行いました。解析の結果、波数に関して 1 次のラシュバ項だけでなく、3 次のラシュバ項を想定したモデルを使って初めて実験結果をよく説明することができました。さらに、KTaO₃ のスピン軌道相互作用を見積もると InAs と同程度であるにもかかわらずスピン回転長が 20-60 nm と非常に短い原因は、KTaO₃ の電子の有効質量が大きいということであることを明らかにしました。

中村研究者が発見した 3 次のラシュバ効果を使うと、1 次の効果を使う場合に比べてスピン回転の設計自由度が大きいことがわかりました。当初目指したスピン・トランジスタの実現にはまだ距離がありますが、今後 3 次ラシュバ効果の特徴を活用した高機能なスピン素子の開発に期待がもてます。

6. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. H. Nakamura and T. Kimura, "Threshold electric fields controlled by surface treatments in KTaO₃ field-effect transistors", *J. Appl. Phys*, **107**, 074508 (2010).
2. D. Sekiya, H. Nakamura, and T. Kimura, "Enhanced Carrier Injection in Perovskite Field-Effect Transistors via Low-Barrier Contacts", *Appl. Phys. Express*, **4**, 064103 (2011).
3. H. Nakamura, T. Koga, and T. Kimura, "Experimental Evidence of Cubic Rashba Effect in an Inversion-Symmetric Oxide", *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 206601 (2012).

(2) 特許出願

なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物等)

国際会議発表(下記など 8 件)

- [1] H. Nakamura, T. Koga, and T. Kimura, "Observation of k-cubic Rashba effect in

SrTiO₃", Workshop on Oxide Electronics (WOE 19), Apeldoorn, Netherlands (2012/10/1)

[2] H. Nakamura, D. Sekiya, T. Koga, and T. Kimura, "Phase coherence and localization effect in gated KTaO₃", Workshop on Oxide Electronics (WOE 18), Napa, USA (2011/9/27).

[3] H. Nakamura and T. Kimura, "Strong spin-orbit coupling and its manipulation in KTaO₃ field-effect transistors", 11th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron System, Jeju Korea (2011/2/10).

[4] H. Nakamura and T. Kimura, "Antilocalization in KTaO₃ induced by gate electric field", International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials, Suita Japan (2010/5/30).

[5] H. Nakamura and T. Kimura, "Electric field control of spin precession in KTaO₃ field-effect transistor", American Physical Society, March meeting, Portland USA (2010/3/17).