

Giant gate-controlled odd-parity magnetoresistance effect in InAs/(Ga,Fe)Sb

福澤 亮太¹、瀧口 耕介²

¹ 工学系研究科 電気系工学専攻 高橋研究室

² 工学系研究科 電気系工学専攻 田中・大矢研究室

著者紹介

福澤 亮太：博士過程では、原子間力顕微鏡を用いた局所的半導体のデバイス特性評価法について理論及び実験的な研究に従事している。本研究では、原子間力顕微鏡を用いて仕事関数の局所解析を行った。

瀧口 耕介：博士過程では、半導体ヘテロ接合における新規磁気伝導現象について研究している。本研究では、InAs/(Ga,Fe)Sb 試料の作成、及び電気抵抗測定などを行った。

要旨

一般の物質の電気抵抗は磁場 B に対して偶関数的に振る舞うことが知られている。しかし、系によっては磁場 B に対して奇関数成分を含むという報告例がある（奇パリティ磁気抵抗効果：OMR）。その起源として、1. バンドのトポロジー的性質によるエッジ状態、2. フェルミレベルピニング由来の三角ポテンシャルによるエッジ状態、の二つが考えられている。今回著者らは、InAs/(Ga,Fe)Sb ヘテロ接合にて室温で OMR が観測されることを確認し、原子間力顕微鏡を用いて仕事関数の面内分布を調査することで、OMR の起源がフェルミレベルピニングによる三角ポテンシャルによるものであることを明らかにした。

1 背景

オンサガーの相反性により、一般に、物質の電気抵抗は磁場 B に対して偶関数的にふるまうことが知られている。しかしながら、近年、磁場に対する奇数次成分が現れたという報告がある (OMR)[1, 2, 3, 4]。このような OMR は、空間反転対称性および時間反転対称性が著しく敗れている系において現れている。しかし、OMR の本質的な理解には至っていない。著者らによるこれまでの研究で、OMR の発現には試料端での電気伝導（エッジ伝導）が関わっていることが理論的に示されている。このエッジ伝導の起源としては、バンドのトポロジカル的性質に由来するもの [5] と、表面フェルミレベルピニングによる三角ポテンシャル由来のもの [6] が提案されている。

今回、InAs/(Ga,Fe)Sb ヘテロ接合にて観測される OMR の起源を解明すべく、自発的融合研究に取り組んだ。

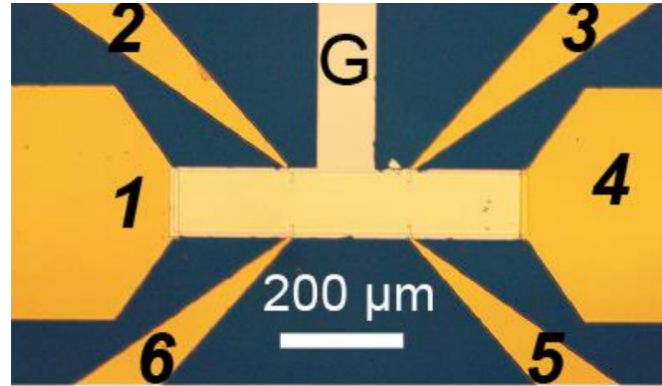


Fig.1 Optical microscopic image of the Hall bar device with the gate electrode G.

2 実験方法

2.1 試料作製

分子線エピタキシー法を用いて作成した。試料構造は、表面から順に InAs(15 nm)/(Ga_{1-x}Fe_x) (15 nm, $x = 0.2$) / AlSb (200 nm)/AlAs (10 nm)/GaAs (100 nm) を GaAs(001) (半絶縁) 基板上に結晶成長した。

2.2 電気抵抗測定

作成した InAs/(Ga,Fe)Sb 上に、Fig. 1 に示すような電極を作成し、ホールバーの複数の端子間について電気抵抗を測定する。なお、磁場中での電気抵抗はテンソル量である。ここでは、電極 1 から 4 の方向に電流 (I_{14} と表記) を流した際の、端子 i, j 間の電圧 V_{ij} を用いて抵抗を $R_{ij} := V_{ij}/I_{14}$ と定義する。

2.3 表面ポテンシャル分布測定

InAs のエッジにて、三角ポテンシャルが形成されていることを検証するため、周波数変調型ケルビンプローブフォース顕微鏡法 (FM-KFM) を用いた。以下にその原理を示す。周波数変調型原子間力顕微鏡 (FM-AFM) は、カンチレバーの先端に搭載された探針に作用する相互作用力をカンチレバーの振動状態の変化から検出する手法であり、FM-KFM は FM-AFM のアプリケーションの一つである。探針に相互作用力を $F(z) \approx F(z_0) + (\partial F(z_0)/\partial z)\Delta z$ (z :探針-試料間距離) が作用した時の運動方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 m\ddot{z} &= -k\Delta z - \gamma\dot{z} + F(z_0) + (\partial F(z_0)/\partial z)\Delta z + O(\Delta z) \\
 &= F(z_0) - \left(k - \frac{\partial F(z_0)}{\partial z}\right)\Delta z - \gamma\dot{z} + O(\Delta z)
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 k はばね定数、 γ は減衰係数、 m はカンチレバー系をばねと質点からなる系でモデル化した時の質量である。(1) 式から、相互作用の力勾配 ($\partial F(z_0)/\partial z$) によってばね定数が変化することがわかり、これにより共振周波数が変化する。

交流電圧 $V_{AC} \sin \omega t$ 及び直流バイアス V_{DC} を探針-試料間に印加した際に作用する静電引力 F_{ef} は、平行平板近似 (静電容量: C , 極版間電圧: V , Q_{total} : 電源及びコンデンサが蓄えている総電荷) の下で電源及びコンデンサからなる全エネルギー U が

$$\begin{aligned} U(C, V) &= \frac{1}{2}CV^2 + (Q_{total} - Q)V \\ &= -\frac{1}{2}CV^2 + Q_{total}V, \end{aligned}$$

であることから,

$$\begin{aligned} F_{ef} &= \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} \left(\underbrace{V_{DC} - \frac{\Delta\phi}{e}}_{:=V_0} + V_{AC} \sin \omega t \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} (V_0)^2 + \frac{1}{4} V_{AC}^2 \\ &\quad + \frac{dC}{dz} \left(V_{DC} - \frac{\Delta\phi}{e} \right) V_{AC} \sin \omega t (=: F_{1\omega}) \\ &\quad - \frac{1}{4} \frac{dC}{dz} \cos 2\omega t, \end{aligned}$$

とわかる。ここで $\Delta\phi$ は探針と試料の仕事関数差、 e は電気素量、 z は探針-試料間距離である (ここでは電子の電荷を $-e$ としている)。FM-KFM では、静電引力の力勾配によるカンチレバーの機械的共振周波数のシフト (Δf) のうち、周波数 ω 成分 $\Delta f_{1\omega} (\propto F_{1\omega})$ をロックイン検出し、 $\Delta f_{1\omega}$ がゼロとなるような V_{DC} を探すことで仕事関数差 $\Delta\phi$ を求めることができる。試料面内にわたって $\Delta\phi$ を測定することで、カンチレバーの仕事関数を基準とした表面ポテンシャル分布が測定できる。

静電引力は長距離力であり、探針先端だけでなく、カンチレバーにも作用する。そのため、空間分解能が低下してしまう。しかし、カンチレバー部分と試料表面との距離は探針先端と試料表面との距離に比べて 4 桁程度大きく、静電引力の力勾配もは探針先端に比べると十分小さいため、力勾配を検出すればこのような影響は低減できる。今回は、力ではなく力勾配を検出する FM-KFM によって、カンチレバー部分の寄与を大幅に減らすことで、高分解能化を行った。

FM-KFM では電位分解能は、周波数シフトの検出限界によって律速される。このため、カンチレバーの Q 値が高い方が高精度・高感度化が見込める。また、表面吸着水が存在すると、表面電位を変えてしまう。今回は、高 Q 値化と吸着水の除去のため、真空環境下 ($\sim 10^{-5}$ Pa) で測定を行った。

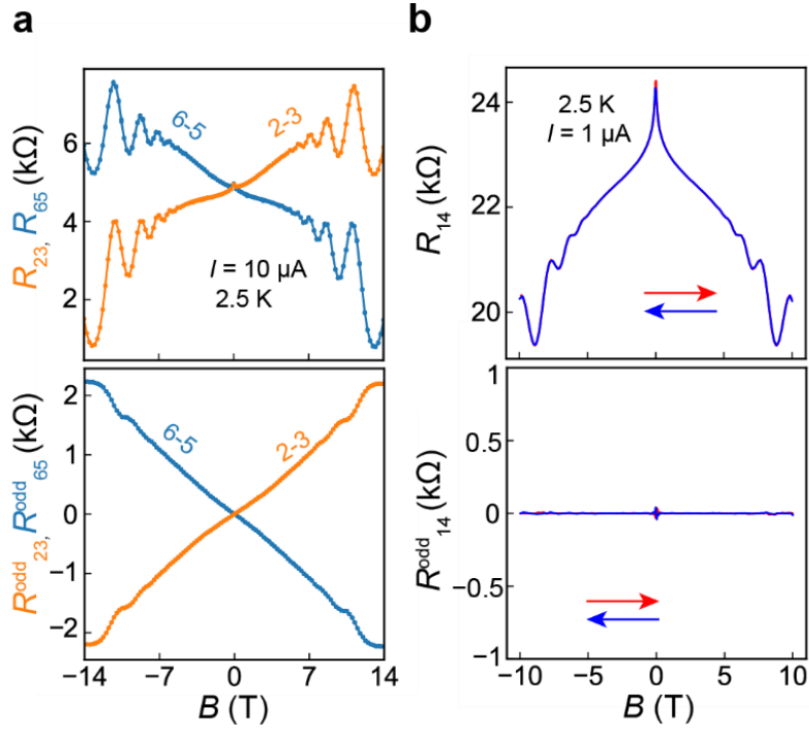


Fig.2 a, Comparison of the B dependences of R_{23} and R_{65} (upper panel) and their odd-function components (lower panel) measured with a fixed current of $10 \mu\text{A}$ at 2.5 K . b, MRs of R_{14} (upper panel) and its odd component (lower panel) measured with a fixed current of $1 \mu\text{A}$ at 2.5 K

3 結果と考察

抵抗の磁場依存性測定の結果を Fig. 2 に示す。図の上段から、奇関数成分 R_{ij}^{odd} を抜き出してプロットしたものを下段に示す。 R_{23}^{odd} および R_{65}^{odd} では磁場に対してほぼ線形に変化していることが確認できる。一方で、 R_{14}^{odd} は磁場によらずゼロであった。これは R_{ij}^{odd} にエッジ伝導が関与しているからと考えられる。 R_{14}^{odd} では、対称性により、端子 1 側のエッジ伝導と端子 4 側のエッジ伝導による寄与が打ち消しあうため、エッジ伝導に起因した R_{14}^{odd} は現れなかったと考えられる。続いて、 R_{24}^{odd} の温度依存性を Fig. 3 に示す。今回の系では、室温でも OMR が確認された。トポロジカル物質としてのギャップはおおよそ 4 meV であり、室温での OMR はトポロジカル的な性質だけでは説明できない。

続いて、FM-KFM による InAs の表面ポテンシャル測定の結果を Fig. 4 に示す。InAs エッジに沿って表面ポテンシャル測定を行ったところ、エッジに向かっておよそ 20 meV だけバンドが曲がっていることが確認された。しかし、遷移領域は μm オーダーであり、予想されるポテンシャルよりも広く観測されている。これは、試料の最表面に存在する表面準位によってエッジ以外にも、表面から奥行き方向に三角ポテンシャルが存在しており、バルク内部でのエッジに向かったバンド

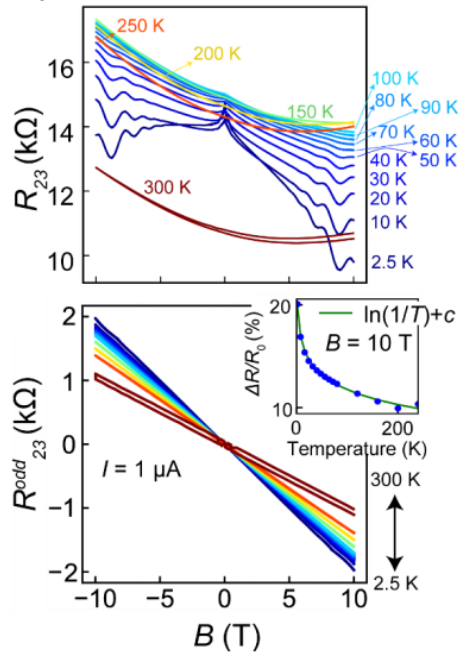


Fig.3 Temperature dependences of R_{23} and R_{odd23} at 2.5 – 300K under $1\mu\text{A}$

曲がりよりも、大きく広がってしまったことが予想される。FM-KFM でのポテンシャル分布はあくまでも試料最表面でのポテンシャル分布であるため、一般の pn 接合上での電位測定などでも、表面電位差がバルク理論値の半分以下に、また遷移領域は理論値よりも広く観測されることが報告されている [7, 8]。本実験でもそのような影響が現れているものと解釈しているが、ポテンシャル分布の定性的な振る舞いは同一であると考えている。そのため、KFM の結果から InAs エッジに三角ポテンシャルが存在していると考えられる。

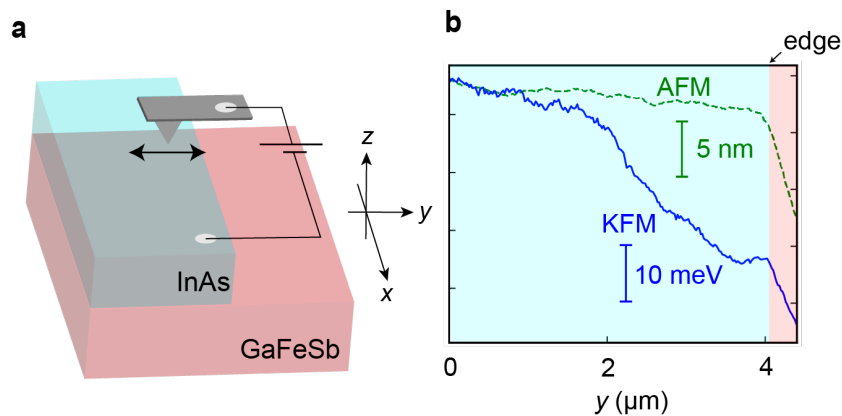


Fig.4 Surface potential distribution on InAs by FM-KFM. a, schematic diagram of the KFM measurements. b, height and potential distributions around edge of InAs.

以上の温度依存性および表面ポテンシャル測定の結果から、InAs/(Ga,Fe)Sb で観測される

OMR の起源にはフェルミレベルピンング由来のエッジ伝導が支配的だと考えられる。

4 結論

本研究では、InAs/(Ga,Fe)Sb 中で観測される奇数次磁気抵抗効果 (OMR) の解明に向けて、温度依存性測定と表面ポテンシャル測定を行った。室温での OMR 観測と InAs エッジでの三角ポテンシャルの存在が確認され、InAs/(Ga,Fe)Sb での OMR は、フェルミレベルピンング由来のエッジ伝導が OMR に寄与していることが示唆された。

謝辞

本研究でご支援とご協力を頂いた、指導教員の高橋琢二教授、田中雅明教授、副指導教員の平本俊郎教授、石坂香子教授に感謝いたします。本研究の機会を頂いた MERIT に感謝いたします。

参考文献

- [1] Moubah, R. *et al. J. of Appl. Phys.* **115**, 053911 (2014).
- [2] Wang, Y *et al. Nat. Commun.* **11**, 216 (2020).
- [3] Fujita, T C *et al. Sci. Rep.* **5**, 9711 (2019).
- [4] Albarakati, S *et al. Sci. Adv.* **5**, eaaw0409 (2019).
- [5] J. A. Peters *et al. Phys. Rev. B* **82**, 205207 (2010).
- [6] Suzuki, K *et al. Phys. Rev. B* **87**, 235311 (2013).
- [7] S. Saraf, *Surf. Sci.* **574**, L35 (2005).
- [8] T. Uruma, *et al. Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 08NB10 (2016).