

量子ホールエッジ状態から量子ドットへの スピン依存電気伝導



研究ノート

木山 治樹*, 大岩 顕**, 樽茶 清悟***

Spin injection into a quantum dot from quantum Hall edge states

Key Words : Quantum dot, Quantum Hall edge states, Spin injection

1. はじめに

半導体微細加工技術の進歩によってナノメートルスケールの半導体ナノ構造の作製が可能になり、新しい量子効果の実証や精密な制御が盛んに研究されている。ガリウム砒素 (GaAs) などの半導体中の電子をド・ブロイ波長程度の空間に閉じ込めると、エネルギー準位は量子化し、また電子を一個ずつ出し入れできるようになる。このような半導体ナノ構造は量子ドットと呼ばれる。電子には電荷のほかにス

ピンの自由度があり、量子ドット中の電子スピンを利用した量子情報処理などへの応用が期待されている [1,2]。

量子ドット中の電子スピンを利用するためには、スピンの注入や検出が必要不可欠である。これまで様々な手法でのスピンの注入や検出が報告されているが [2]、我々はさらに高効率、多機能なスピン注入/検出を目指し、量子ホールエッジ状態を利用したスピン依存電気伝導に着目した。本稿では、量子ドット-エッジ状態間のスピン依存電気伝導の制御と非平衡エッジ状態を用いた選択的スピン注入について紹介する。



* Haruki KIYAMA

1983年9月生
東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 (2012年)
現在、大阪大学 産業科学研究所 助教
博士(工学) 半導体低次元物性
TEL : 06-6879-8406
FAX : 06-6879-8409
E-mail : kiyama@sanken.osaka-u.ac.jp



** Akira OIWA

1971年5月生
東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻 (1999年)
現在、大阪大学 産業科学研究所 教授
博士(理学) 半導体低次元物理
TEL : 06-6879-8405
FAX : 06-6879-8409
E-mail : oiwa@sanken.osaka-u.ac.jp



*** Seigo TARUCHA

1953年9月生
東京大学 工学部 物理工学科 (1976年)
現在、東京大学 大学院 工学系研究科
物理工学専攻 教授 工学博士
半導体物理 量子情報
TEL : 0358416835
FAX : 0358416835
E-mail : tarucha@ap.t.u-tokyo.ac.jp

2. エッジ状態によるスピンフィルター効果の電 氣的制御

二次元電子面を有する GaAs/AlGaAs ヘテロ基板表面に図 1(a) のようなゲート電極を作製し、負電圧を印加すると、図 1(a) 白丸の位置のヘテロ界面に電子が数個から数十個閉じ込められ、量子ドットが形成される。ソース・ドレイン電極はドット周囲の二次元電子面であり、ポテンシャル障壁を挟んでドットとトンネル結合している。

この試料に 1 テスラ程度の面直磁場を加えると、ポテンシャル障壁に沿って量子ホールエッジ状態と呼ばれる一次元伝導チャンネルが形成される [図 1(a) 橙線と青線]。このエッジ状態は、ゼーマン分裂とポテンシャル障壁の傾斜によって空間的にスピン分離する。その結果、ドットとエッジ状態の距離はスピンによって異なり、スピン依存トンネル結合が生じる [3]。アップスピンのトンネル結合がダウンスピンに比べて大きく、アップスピンの優先的にドットにトンネルする。これをエッジ状態スピンフィルター効果と呼ぶ。

スピンフィルター効率はエッジ状態の空間的スピ

ン分離が大きいほど高いと考えられ、またエッジ状態スピン分離はゼーマン分裂の大きさとポテンシャル障壁の傾きによって決まる。そこで我々はゲート電圧によってポテンシャルの傾きを変調し、スピンフィルター効率の制御を行った [4]。ポテンシャル変調には、トンネル障壁近傍に設置したゲート電極 ML と MR を使用した [図 1(a)]。図 1(b) に本手法の模式図を示す。ゲート MR の電圧 V_{MR} がゼロの場合に比べ、 $V_{MR} < 0$ ではポテンシャルの傾きが緩やかで、エッジ状態スピン分離 (黄色領域の幅) が大きい。

上記の手法を量子ドットの電気伝導度測定により確認した。測定は希釈冷凍機を用いて電子温度 430mK で行った。またゲート ML と MR には同一の電圧 V_M を印加した。図 2(a) に $V_M = +40\text{mV}$ におけるドット電気伝導度を示す。縦軸がゲート P の電圧 V_P で横軸が面直磁場である。特定の V_P において伝導度が高くなっているが、これをクーロンピークと呼ぶ。クーロンピークの V_P は磁場によってジグザグ型に変化している。このピーク位置変化の理由は省略するが、ここで重要なのはガイドの黒線の太さで表されているように、クーロンピーク伝導度が変わる点である。磁場やドットの電子数が変わると、パウリ原理とフント則に従ってドットを流れる電子スピンが変化する。この伝導電子スピンの変化が、

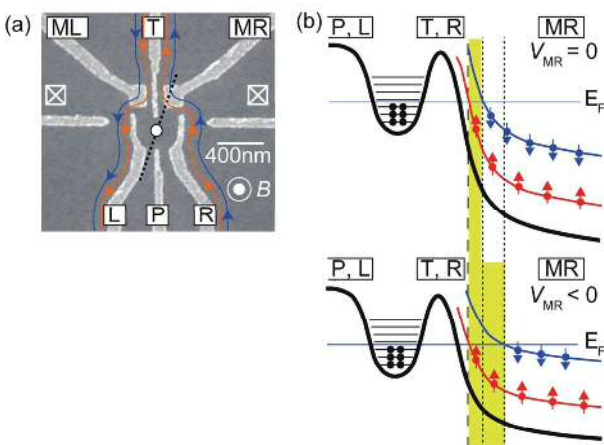


図 1. (a) スピンフィルター効果制御に用いた試料の電子顕微鏡写真。(b) スピンフィルター効果制御の原理。ゲート MR の電圧 V_{MR} が 0 V (上図) と負 (下図) のときについて、量子ドットの静電ポテンシャルを黒線、アップスピンとダウンスピンの最低ランダウ準位をそれぞれ赤線と青線で示してある。 $V_{MR} < 0$ の方が、ポテンシャルの変化が緩やかで、エッジ状態のスピン分離 (黄色領域の幅) が大きい。

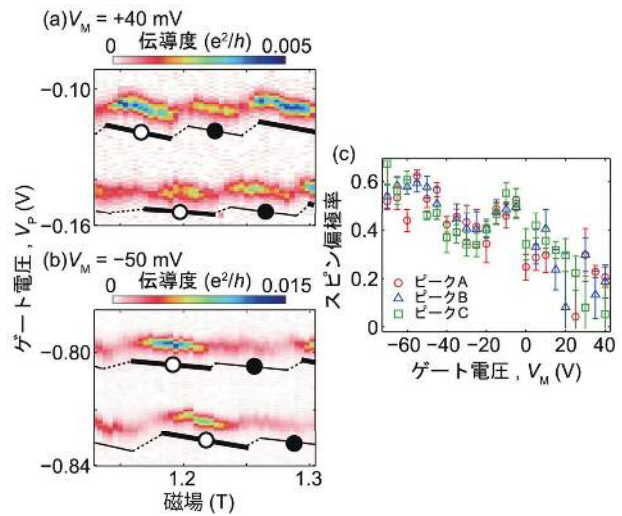


図 2. $V_M = +40\text{mV}$ (a) と $V_M = -50\text{mV}$ (b) におけるクーロン振動の磁場依存性。黒太線と黒細線はそれぞれアップスピンとダウンスピンの伝導を表す。(c) ドット電流のスピン偏極率の V_M 依存性。

スピンフィルター効果によって伝導度 (電流) の違いとして現れている。すなわち、伝導度の高いピークではアップスピンが、伝導度の低いピークではダウンスピンが伝導している。

次に $V_M = -50\text{mV}$ で測定した結果を図 2(b) に示す。 $V_M = +40\text{mV}$ では僅かであったスピンによる伝導度の違いがより鮮明になっている。これは負の V_M 印加によるスピンフィルター効率向上を意味する。より詳細な測定結果として、ドット電流スピン偏極率の V_M 依存性を図 2(c) に示す。ここでのスピン偏極率は、任意のスピンが伝導可能な条件で、スピンフィルター効果によってドット電流がどの程度スピン偏極するかを示す指標であり、過去の報告例では 0.7 程度である。図 2(c) を見ると、 V_M が負になるにつれスピン偏極率が単調増加しており、 V_M によるスピンフィルター効果の制御が確認できる。またスピン偏極率は 0.6 程度と過去の報告例よりもやや低い値で飽和傾向が見られる。この原因の一つとしてゲート ML と MR の形状が最適でないことが考えられる。電極形状を改良した試料においては 0.91 と高いスピン偏極率を観測している [4]。以上のスピンフィルター効果の電氣的制御手法は、今回の GaAs だけでなく Si など他の二次元電子面を用いた量子ドットにも適用可能であり、今後広く応用されていくと期待される。

3. 非平衡エッジ状態を用いた選択的スピン注入

前節で述べたエッジ状態スピンフィルター効果では基底状態であるアップスピンを量子ドットに注入できるが、励起状態のダウンスピンのみを選択的に注入することはできない。両方のスピンの注入とその切り替えは、例えば強磁性電極を使用し、外部磁場で磁化を反転させれば可能であるが、電気的な切り替えは未だ報告例がない。そこで我々は非平衡エッジ状態を利用し、電気的に選択可能なスピン注入を行った [5]。

試料は量子ドット、エッジ状態を選択的に透過するためのゲート電極 LC、エッジ状態の電気化学ポテンシャル制御用オーミック電極 S1 と S2、およびドット電流測定用オーミック電極 D で構成される [図 3(a)]。本手法の概略は以下の通りである。ゲート LC の電圧を調整して、アップスピンエッジ状態 [図 3(a) 赤線] のみがゲート LC を透過し、ダウンスピンエッジ状態 [図 3(a) 青点線] は反射されるようにする。すると、ドット近傍でのアップスピンとダウンスピンのエッジ状態の電気化学ポテンシャル (それぞれ μ_{\uparrow} と μ_{\downarrow}) は、オーミック電極 S1 と S2 の電圧で独立に制御できる。S1 に負電圧を加えれば μ_{\uparrow} が上昇してアップスピンのドットに注入され、S2 に負電圧を加えれば μ_{\downarrow} が上昇し、ダウンスピンが注入される [図 3(b)]。

上記の選択的スピン注入をドット電流測定により確認した。前節と同様に、異なるクーロンピークにおいてアップスピン電流 I_{\uparrow} とダウンスピン電流 I_{\downarrow} を測定した。図 4(a) にアップスピン偏極非平衡エッジ状態形成時の測定結果を示す。横軸はゲート LC の電圧 V_{LC} である。また ν_g はゲート LC を通る

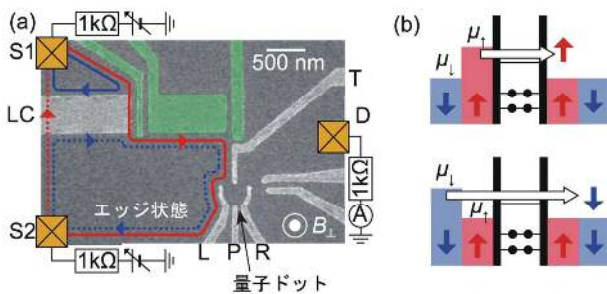


図 3. (a) 非平衡エッジ状態からのスピン注入に用いた試料の電子顕微鏡写真。(b) スピン注入手法の模式図。特定のスピンのエッジ状態のみの電気化学ポテンシャルを変化させ、そのスピンを量子ドットに注入する。

エッジ状態の数を表している。 $V_{LC} > -0.51V (\nu_g > 2)$ での電流値の変化はエッジ状態間の散乱によるものであり、詳細は省略する。 $\nu_g = 2$ では両方のスピンのエッジ状態が 1 本ずつ透過しており、そこから V_{LC} を減らすとダウンスピンエッジ状態がゲート LC で反射され、 $\nu_g < 1$ ではアップスピンエッジ状態が反射される。これに対応して、図 4(a) では I_{\downarrow} が、 $\nu_g < 1$ で I_{\uparrow} が減少している。図 4(c) の実線はこの場合のドット電流スピン偏極率である。 $V_{LC} = -0.4V$ での値 ~ 0.1 は前節のスピンフィルター効果によるものであるが、 $V_{LC} = -0.55V (\nu_g \sim 1)$ で 0.3 に増加している。つまり $\nu_g \sim 1$ でアップスピン偏極非平衡状態を生成することで、より効率的に量子ドットにアップスピンを注入できることを示唆している。

次にダウンスピン偏極非平衡エッジ状態形成時の測定結果を図 4(b) に示す。 $\nu_g < 2$ でダウンスピンエッジ状態が LC で反射された結果 I_{\downarrow} が増加し、 $\nu_g < 1$ でアップスピンエッジ状態が反射され I_{\uparrow} が増加している。図 4(c) の点線がこの場合のスピン偏極率である。 $\nu_g \sim 1$ でおおよそ -0.3 と負の値とな

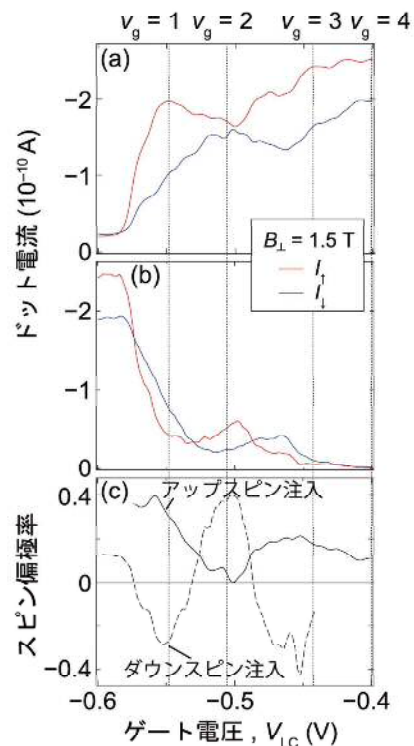


図 4. アップスピン偏極非平衡エッジ状態形成時 (a) とダウンスピン偏極時 (b) のドット電流の V_{LC} 依存性。静電閉じ込めの違いを補正してある。(c) ドット電流スピン偏極率の V_{LC} 依存性。

り、量子ドットへのダウンスピン注入を意味している。また $V_{LC} = -0.5V$ で $+0.3$ 、 $V_{LC} = -0.46V$ で -0.3 のスピン偏極率が得られているが、これらはエッジ状態間の散乱によるものである。

以上のように、 $V_{LC} = -0.5V$ ($\nu_g \sim 1$) において、量子ドットへのアップスピン注入とダウンスピン注入をオーミック電極 S1 と S2 の電圧によって切り替えることができた。

4. おわりに

量子ドット-エッジ状態間スピン依存電気伝導に関して、我々の二つの成果について紹介した。最近では、エッジ状態による遠隔量子ドット間のスピン情報伝達が提案されるなど注目を集めている。今後は電子スピンの位相の情報を含めた量子ドットへの注入/放出など、更なる研究が期待される。

謝辞

本研究は科研費若手研究 (B) (No. 15K17681)、基盤研究 (A) (No. 25246005)、基盤研究 (S) (No. 26220710)、新学術領域「ナノスピン変換科学」、内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] D. Loss and D.P. DiVincenzo, Phys. Rev. A **57**, 120 (1998).
- [2] R. Hanson *et al.*, Rev. Mod. Phys. **79**, 1217 (2007).
- [3] M. Ciorga *et al.*, Phys. Rev. B **61**, R16315 (2000).
- [4] H. Kiyama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 263101 (2014).
- [5] H. Kiyama *et al.*, Phys. Rev. B **91**, 155302 (2015).

