

# シングルリード量子ドットプローブを用いた半導体微細材料中の局所電子状態の評価

大塚 朋 廣\*

## Probing local electronic states in semiconductor micro structures utilizing single-lead quantum dots

Tomohiro Otsuka\*

We probed local electronic states and local phenomena in semiconductor micro devices utilizing quantum dots and quantum point contacts. The measurement of the local electronic states in the quantum Hall regime with quantum point contacts was demonstrated. We confirmed the validity of the new probes and revealed a possible mechanism of the energy relaxation around a hot spot. We also improved the operation speed of the local probes utilizing the technique of radio frequency reflectometry and demonstrated the fast spin readout.

### 1. はじめに

近年、情報処理デバイスの超低消費電力化や多機能化に向け、スピントロニクスデバイスや量子情報処理デバイス等、従来のデバイスとは異なる動作原理に基づく革新デバイスが提案されている。この新デバイスにおいては、従来のデバイスにも増して、スピン効果や量子効果を示す半導体微細材料中の局所電子状態が本質的に重要な役割を果たす。そこで有用なデバイスを創成するためには、デバイスの性能を左右する内部の局所電子状態を理解することが重要となる。

そこで本研究では、半導体微細材料中の局所電子状態にアクセスするために量子ドット等を用いた新しい局所プローブ<sup>1,2</sup>を用いて半導体微細材料中の局所電子状態およびその物理現象を調べた。量子ドットや量子ポイントコンタクトは微小領域に電子を閉じ込める構造で、良く定まった準位を持ち、かつその状態を電圧等で制御できる人工準位として振る舞う。この人工準位を固体中の電子状態のマイクロなプローブとして用いれば、これまでの古典的なマクロなプローブでは不可能であった測定が可能となる。通常の電気伝導測定では、試料全体の平均的な性質が見られるのに対して、マイクロなプローブを使うことで、その性質を支配している局所的な領域を特定し、性質を調べることができる。

### 2. 量子ホールエッジ状態における局所電子状態およびエネルギー緩和の測定

半導体中の二次元電子に磁場をかけた際に形成される量子ホールエッジ状態は、長い緩和長や良く定まった方向性を持ち、固体電子素子や、量子情報処理への応用が提案されている。この応用に向けては、量子ホールエッジ状態の局所的な電子状態、また内部のエネルギー緩和を理解することが重要となる。我々はこの局所電子状態、エネルギー緩和を量子ポイントコンタクト (QPC) を使って測定できることを示し、またこの測定手法を量子ホール領域におけるホットスポットに適用した<sup>3,4</sup>。特に本年度は実験結果の解析を重点的に行った。

本研究に用いた実験試料は GaAs/AlGaAs ヘテロ基板を加工して作製した。量子ホールエッジ状態が形成されるホールバー構造にエッジ状態の変調および局所電子状態を計測するための QPC が結合した構造になっている (図 1 (a))。QPC<sub>1</sub> を用いてエッジ状態の電気化学ポテンシャル等を局所的に変化させ、生じた局所電子状態が伝播とともに変化していく様子を QPC<sub>2</sub> から QPC<sub>5</sub> を使って測定した。

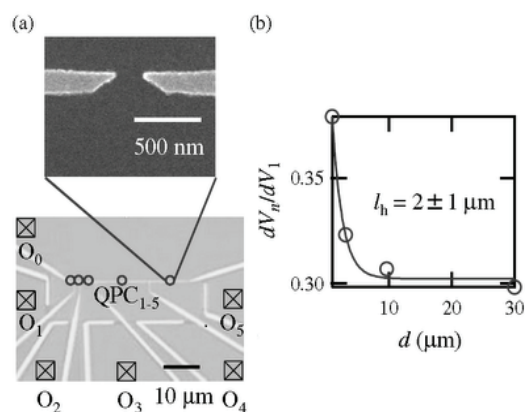


図 1. (a) 測定試料の電子および光学顕微鏡写真 (b) 量子ホール領域のホットスポット周りにおけるプローブ電位の測定結果

まず QPC<sub>1</sub> を使ってエッジ状態間に電気化学ポテンシャルの差を作り出し、量子ホールエッジ状態間で電子のトンネルがある場合について測定を行った。この結果、30  $\mu\text{m}$  以下の範囲ではプローブ電位の変化はなく、エネルギー緩和長は 30  $\mu\text{m}$  以上であることが確かめられた。次に QPC<sub>1</sub> を使って 2 つの Fermi 面を持つ非平衡な電子分布をエッジ状態に作り出し、量子ホールエッジ状態間でエネルギーのやりとりのみがある場合について測定を行った。この場合には伝播距離の増大に伴いプローブ電位の減少が観測され、エネルギー緩和長が 3  $\mu\text{m}$  であることが確かめられた。これらの結果は別の手法による先行研究の結果と一致するものとなっており、QPC を用いた手法の正当性を確認することができた。

そしてこの QPC を使った手法を用いて、量子ホール領域においてエネルギー緩和が特異的に起こるホットスポット近傍でのエネルギー緩和を測定した。QPC<sub>1</sub> に大きなバイアス電圧を印可してホットスポットを形成し、その周りのプローブ電位を測定したところ、伝播距離の増大に伴いプローブ電位の減少が図 1 (b) のように観測され、エネルギー緩和長が 2  $\mu\text{m}$  となることが分かった。この結果はエッジ状態間でエネルギーのやりとりのみがある場合の値に近く、ホットスポット周りのエネルギー緩和機構にエッジ状態間でのエネルギーのやりとりが寄与していることが分かった。

### 3. 量子ドットプローブの高速化

半導体微細材料を用いた情報処理デバイス的高速化、高効率化のためには、局所電子状態の静的な特性だけでなく、そのダイナミクスの理解が重要となる。近年、QPC 等を用いた電荷検出器を高周波共振回路に組み込み、高周波の反射測定を行うことにより、量子ドット中の単一電荷を高速 ( $\mu\text{s}$  オーダー) で読み出すことが可能となっている。この読み出し時間は、電子スピンの緩和時間よりも短くなっており、アンサンブルでない単一の電子について量子状態が緩和する前に測定を完了するというこれまでの電気測定では不可能であった測定が可能である。実際にこの技術は量子情報処理に向けた多重量子ドット系の測定<sup>5,6</sup>に用いられるようになっており、また量子ドットプローブの高速化を行う上で重要となる。本研究ではこの高速読み出しに必要な高周波変調、測定系を構築し、測定時間の評価を行った。

本研究では GaAs/AlGaAs ヘテロ基板を加工して作製した多重量子ドット試料を用いて、電荷検出器を含んだ共振回路を作製し高周波反射測定を行った。量子ドット内の電子数は 1 個から 2 個に遷移する状態に設定し、パウリスピンブロックによってスピン検出ができる条件に設定している。図 2 のように測定時間を変化させながら高周波信号のカウント数を調べると、測定時間 25  $\mu\text{s}$  以上でスピンシングレット、トリプレットに起因する信号を分離して観測することができ、スピンの緩和時間よりも十分に早く単一スピン検出が実現できることを確かめた。

ここで得られた結果を踏まえ、高速量子ドットプローブをスピン偏極デバイス、量子ホールデバイスに結合させた試料を作製し、局所電子、スピン状態のダイナミクスの測定を展開している。

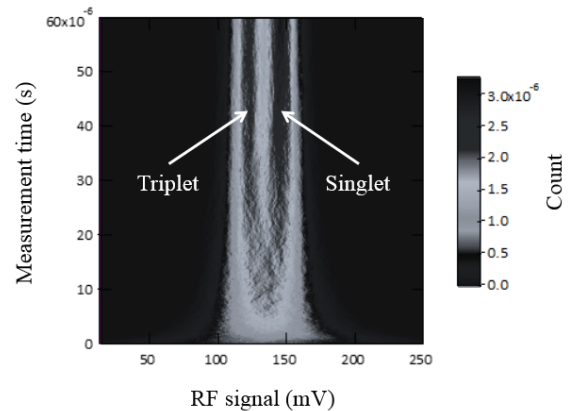


図 2. 高周波反射測定を用いた量子ドット内電荷の高速読み出し測定結果

### 4. まとめ

量子ドット等を用いた新しい局所プローブを用いて半導体微細材料中の局所電子状態およびその物理現象を調べた。特に量子ポイントコンタクトを用いた局所プローブを使って量子ホールエッジ状態における局所電子状態を調べ、そのプローブの動作の確認、さらにホットスポット周りのエネルギー緩和機構について明らかにした。また高周波反射測定技術を用いて量子ドットプローブの高速化を行い、高速にスピン状態を検出できることを確かめた。

### REFERENCES

- (1) T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye, and S. Katsumoto, Phys. Rev. B 81, 245302 (2010)
  - (2) T. Otsuka, Y. Sugihara, J. Yoneda, S. Katsumoto, and S. Tarucha, Phys. Rev. B 86, 081308(R) (2012)
  - (3) T. Otsuka\*, Y. Sugihara\*, J. Yoneda, T. Nakajima and S. Tarucha, EP2DS, Wroclaw, Poland, July 2013
  - (4) T. Otsuka\*, Y. Sugihara\*, J. Yoneda, T. Nakajima, and S. Tarucha, J. Phys. Soc. Japan 83, 014710 (2014)
  - (5) T. Takakura, A. Noiri, T. Obata, T. Otsuka, J. Yoneda, K. Yoshida, and S. Tarucha, Appl. Phys. Lett. 104, 113109 (2014)
  - (6) M. R. Delbeq, T. Nakajima, T. Otsuka, S. Amaha, and S. Tarucha, submitted
- (\*equal contribution)