

# 情報処理・通信に向けたナノ量子デバイス

東北大学 電気通信研究所 量子デバイス(大塚)研究室

## 概要

本研究室では、新しい情報処理、通信に向けた基盤研究として、人工的に作製、制御した固体ナノ構造における物性解明、およびデバイス応用の研究を進めている。ナノメートルスケールの微小な固体ナノ構造では量子効果等の特異な物理現象が生じ、これらを活用することにより新しい機能性デバイスを創製することができる。本研究室では固体ナノ構造中の局所電子状態の電氣的な精密高速観測、制御技術を駆使することにより、固体ナノ構造における物理現象を解明し、また固体ナノ構造における電子物性を活用した新しい材料、デバイスの研究、開発を行っている。これにより量子エレクトロニクスやナノエレクトロニクス等を通して、新しい情報処理、通信技術に貢献することを目指す。

## 背景

### 情報化社会の進展

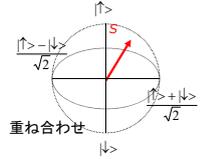
- 人工知能、機械学習技術の発展
- より高度なハードウェア、デバイスの必要性

### 従来のCMOS技術の発展の限界

- 電子集団の古典的自由度のみを活用したエレクトロニクス
- 微細化に伴う物理的限界(発熱、ノイズ、微細限界)

### 量子技術を用いた新しいエレクトロニクス

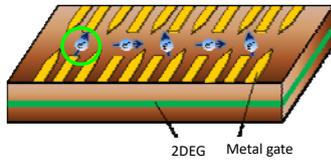
電子の量子力学的自由度を利用したエレクトロニクス



## 固体微細構造中での物理現象の解明

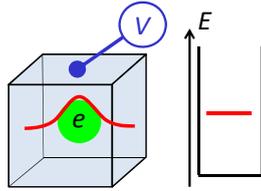
### 固体微細構造

- 新しい物理現象
- 新しいデバイス応用
- 量子デバイス



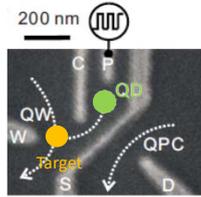
### 半導体量子ドット

- 電子を小さな領域に閉じ込めたデバイス
- サイズ量子化によって内部に量子準位が形成
- 電圧により準位のエネルギーを操作できる
- 操作可能な人工量子状態



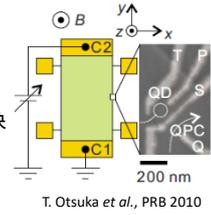
### 半導体量子ドットを用いたマイクロプローブ

- 局所電子状態にアクセスできる
- 良いエネルギー分解能
- 測定における擾乱が小さい

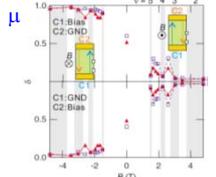


### 局所電子状態の測定

- 量子準位への電子のトンネル
- 測定対象内の電子状態を反映
- マイクロ領域の直接測定
- 電気化学ポテンシャル
- 電子温度

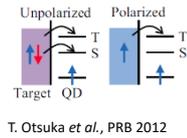


T. Otsuka et al., PRB 2010

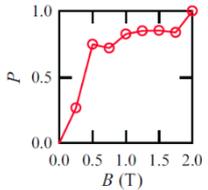


### 局所スピン状態の測定

- スピン依存状態へのトンネルの解析
- 測定対象内のスピン状態を反映
- スピン状態の測定
- スピン偏極

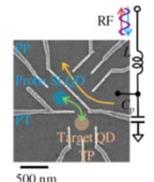


T. Otsuka et al., PRB 2012

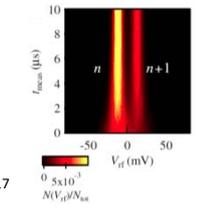


### マイクロプローブの高速化

- 高周波を用いた高速測定
- 高周波反射測定
- 高速な局所電子状態検出
- 単一電荷eをマイクロ秒で検出



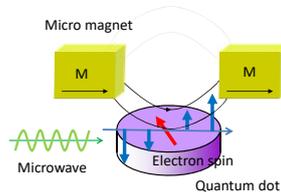
T. Otsuka et al., Sci. Rep. 2015, 2017  
T. Otsuka et al., PRB. 2019



## 量子現象を利用した新デバイスの開発

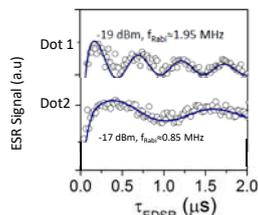
### 量子ドット中の電子スピン

- 長いコヒーレンス時間
- 初期化、読み出し
- スピン状態操作 ESR + VSWAP
- 大規模化
- 量子情報処理に向けたスピン量子ビット



### 微小磁石を用いた量子ビット操作

- 半導体量子ドット内に単一電子をトラップ
- 電子のスピンで量子ビットを作る
- スピン状態の操作 = 量子ビットの操作
- 単一量子ビット操作: 電子スピン共鳴
- エンタングルメント操作: 交換相互作用
- 微小磁石を用いたスピン状態操作
- 高精度操作



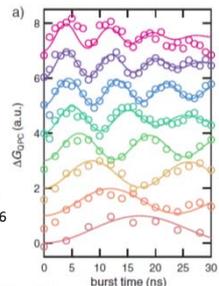
Y. Tokura et al., PRL 2006  
M. Pioro-Ladrière et al., Nat. Phys. 2008  
R. Brunner et al., PRL 2011

### 量子ビット操作の高精度化

- 有限の量子コヒーレンス時間
- 半導体材料中の核スピンの影響
- 操作精度=操作スピード/コヒーレンス時間
- 操作スピードを高速化して高精度化
- 電子スピン共鳴の磁場を強くする
- デバイス構造の最適化



J. Yoneda et al., PRL 2014  
M. Delbecq et al., PRL 2016

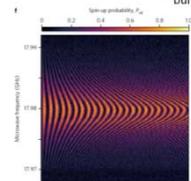


- さらにコヒーレンス時間を伸ばす
- 材料の変更

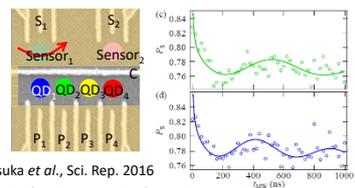
GaAs ⇒ Si  
同位体制御による核スピンの削減

### 量子ビットシステムの大規模化

- 量子ビット数の増加
- 量子ドット数の増加
- 多重量子ドット系におけるスピン状態操作
- 少数電子状態の実現
- スピン状態初期化、読み出し
- スピン状態操作



K. Takeda et al., Sci. Adv. 2016  
J. Yoneda et al., Nature Nanotech. 2018



T. Otsuka et al., Sci. Rep. 2016  
T. Nakajima et al., Nature Nanotech. 2019