

量子情報処理に向けた時間と原子空間分解能を持つスピコヒーレンス顕微鏡の開発

Development of Spin Coherent Microscopy with Time and Space Resolutions Dedicated for Quantum Information Processes

課題番号：19H05621

米田 忠弘 (KOMEDA Tadahiro)

東北大学・多元物質科学研究所・教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、量子コンピューターの核心となるキュービットを、分子スピンを用いて構築するための基盤技術を確立することが目標である。従来 ESR/NMR を用いて多数の分子アセンブリーで検知したスピン状態を、電流を用いた検知を用いて単一分子での分析を可能とする技術を開発するとともに、単一分子の電子・核スピンを RF 照射による量子操作を行う。

研究分野：ナノ計測

キーワード：ナノ顕微鏡技術 薄膜エレクトロニクス 量子情報処理

1. 研究開始当初の背景

量子コンピューターに関心が集まるが、その発展のためには量子ビット (qubit) を高い精度で作製することが必須である。材料としては超伝導体や半導体量子ドットに加え、単一分子磁石など磁性分子が注目されている。いずれの材料においても qubit の解析・分析技術の確立がその高精度化への近道である。その解析・分析においては、原子レベルの空間分解能でスピンを検出するだけでは不十分で、スピンのダイナミクスや量子重ね合わせを解析できる手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

本プロジェクトの目的は、スピンの波としての量子性、すなわちコヒーレンスを原子レベルで観察可能な顕微鏡を開発することである。遂行されれば量子情報処理デバイス作成に貢献するだけでなく、電子スピン共鳴 (ESR)・核スピン共鳴 (NMR) を利用する生物学や医療の研究領域にまで波及する。

3. 研究の方法

東北大学・米田グループにおいて、中心となる 1 K 以下で動作する RF のポンププローブ動作を可能とする超高真空 STM 装置を設計・作成、それを用いた金属・超伝導表面上に単分子磁石を中心とした磁性分子を吸着させ、量子コンピューターの基礎構築に向けた基礎研究を行う。城西大・加藤が分子合成、東北大・橋本が電流による核スピン検出、大阪府立大・佐藤が RF による量子操作を分担する。

4. これまでの成果

本プロジェクトでは分子がもつ電子スピン・核スピンを RF で操作し、STM 装置を用いたセットアップで原子分解能を持って現行の ESR/NMR に匹敵する化学分解能と量子操作を可能とする装置検討を行うものである。実験のセットアップとして STM を 1 K 以下の極低温で動作させ、磁場と RF を効率的に導入する要素技術の開発がまず必要である。そのために 2 つの RF 導入手法を設計し、装置を構築した。一番目は SMA 導線で伝達効率を向上させて RF を探針より導入する工夫であり、2 つ目は RF のポンプ・プローブ手法として最適な、効率的な RF 導入を目論んだ独立した 2 つのアンテナをトンネルジャンクションの近傍に

設置する工夫である。この両者を相補的に用い、よく制御された RF 導入システムの設計及び装置構築を世界的に先駆けて成功した (図 1 参照)。

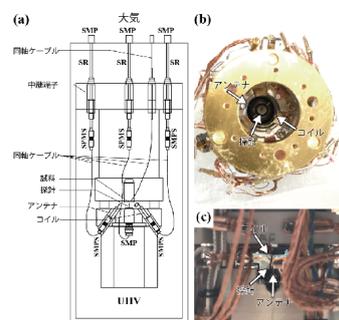


図 1 (a) 新規に設計した RF 導入のコイルとアンテナを対称位置に配した STM ヘッド。(b)(c) その装置の実際

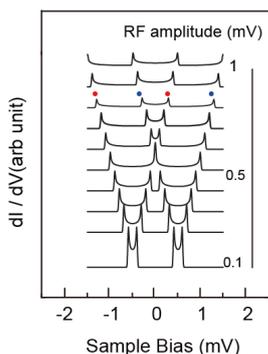


図2 RFを照射したときその強度によって、超伝導ギャップ両端の準粒子が分裂するシミュレーション

も欠かせない装置となっている。超伝導トンネルギャップに RF を照射する実験そのものは、superconductor photo assisted tunneling (SC-PAT) として知られており、RF の光子を出し入れする非弾性トンネル過程として

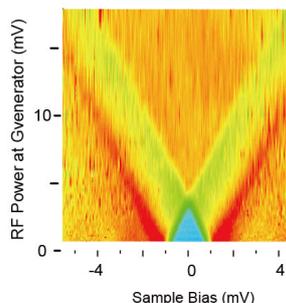


図3 NbSe₂ を試料に用いた RF 照射による PAT 実験の実際。試料温度 300 mK.

理解される。RF の作る電解強度が強くなった場合、多光子吸収・放出が支配的になり半古典的なトンネル過程として扱われ、RF が作る電界強度を V_{μ} とした場合、 eV_{μ} のエネルギーでもっとも強いピークが観測される。ここで超伝導ギャップ両端の準粒子が、SC-PAT の影響で変化する様子のシミュレーションが図2である。 V_{μ} に比例して準粒子のそれぞれが光子の吸収・放出に相当する2つのピークに分裂する。実際に NbSe₂ の探針と基板を用いて、本装置を利用した実験をカラーマップとして図3で表す。マッピングの色の濃淡はコンダクタンス (dI/dV) に相当し濃いほうが大きい値に相当する。横軸がサンプル電位で、縦軸が V_{μ} に相当する。シミュレーションで得られた分裂が正確に再現された。

さらに得られた成果としては、この NbSe₂ 表面で2つの構造、2H と 1T 相が知られているが、これら2つの界面で SC-PAT の挙動を調べた。その構造を図3に示す。RF の強度 V_{μ} を一定にしたとき QP の分裂エネルギーを位置の関数としてプロットしたものを図4に示す。その分裂は5%程度の違いを示している。これは検知された箇所での実質的な RF 強度が表面構造によって異なっていること、すなわち RF 波に対する近接場効果が観察されていると判断している。このことを利用すれば、

この装置を用い最初に超伝導体のサンプル・探針トンネルギャップに RF を照射したときの挙動を調べた。微弱な磁気情報を読み出す手法に超伝導物質を用いる手法は多く用いられており、分子の磁化率測定などで SQUID は化学の分野で

理解される。RF の作る電解強度が強くなった場合、多光子吸収・放出が支配的になり半古典的なトンネル過程として扱われ、RF が作る電界強度を V_{μ} とした場合、 eV_{μ} のエネルギーでもっと

近接場 RF 顕微鏡として、従来知られているより遥かに高いエネルギー分解能、空間分解能をもった化学分析に資する分析手法として利用の可能性はある。

5. 今後の計画 RF をトンネルジャンクションに照射することによって単分子に対する化学分析を原子分解能で構造観察と同時に ESR・NMR 並のスピンを用的化学分析能力を得ようとする計画は順調に進んでおり、現状のところでも記述したが目標の分子を超伝導体と複合体を作成してその鋭いエネルギー準位・準粒子のスペクトル構造の変化として分子のスピンの状態を通して化学分析を行う技術を発展させる

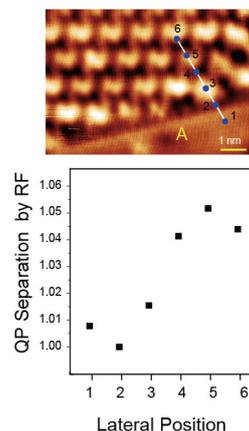


図4 NbSe₂ で観察される 2H 相 (領域 A) と 1T 相。両者とも CDW を示す。位置に依存した SC-PAT エネルギー分裂を検知。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)
- "Enhanced magnetic spin-spin interactions observed between porphyrazine derivatives on Au(111)", J. Hou, Y. Wang, K. Eguchi, C. Nanjo, T. Takaoka, Y. Sainoo, R. Arafune, K. Awaga, *T. Komeda: Communications Chemistry 3, (2020) 36. (査読あり)
 - "Structural, Electronic, and Magnetic Properties of Cobalt Tetrakis (Thiadiazole) Porphyrazine Molecule Films on Au(111)", Y. Wang, J. Hou, K. Eguchi, C. Nanjo, T. Takaoka, Y. Sainoo, K. Awaga, *T. Komeda: ACS Omega 5, (2020) 6676-6683. (10.1021/acsomega.9b04453) (査読あり)
 - "Hybridized Kondo State Formed by π Radical Assemblies", I. Saiful, T. Inose, D. Tanaka, P. Mishra, T. Ogawa, *T. Komeda: J. Phys. Chem. C 124, (2020) 12024-12029. (10.1021/acs.jpcc.0c03998) (査読あり)
 - "Spatially Resolved Surface Vibrational Spectroscopies", T. Komeda, N. Okabayashi, in M. Rocca, T.S. Rahman, L. Vattuone (Eds.), Springer Handbook of Surface Science. Springer Handbooks. Springer, Cham. (2020) p815-852. (10.1007/978-3-030-46906-1_25) (査読あり)

7. ホームページ等

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/>