

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名：低次元ナノマテリアルと単一分子の振動分光・ESR 検出装置開発

2. 研究代表者：米田 忠弘（東北大学多元物質科学研究所 教授）

3. 研究概要

本研究課題は、単一スピン検出および単一分子のフォノン検出・振動分光を目的として、トンネル電流の高感度・高精度解析を原理とした走査トンネル顕微鏡－電子スピン共鳴 (STM－ESR) 分光計測装置および、走査トンネル顕微鏡－分子振動分光 (STM－IETS) 装置を開発しており、中間報告までに以下の成果を達成した。

STM－ESR 装置の開発では、超高真空環境下におけるスピン検出 STM の設計・試作を行い、(1) 位相検知型スピン信号検知システムの構築、(2) データの長時間蓄積と統計処理の自動化などにより、スピンのラーマー (Larmor) 歳差運動と同期した周波数においてトンネル電流が変化することを検知し、STM－ESR 測定において過去に例を見ない高い精度でスピン信号を検出した。すなわち、シリコン清浄表面および極薄酸化膜において位相検出 STM－ESR 実験を行った結果、スピン由来のピークを検出し、そのピークの周波数が磁場に比例して変化することを観測した。

また、STM－IETS においては 400mK、11 テスラ磁場、超高真空という複合極限環境下で動作する STM システムを開発して、銅表面でのマンガノセン分子の吸着状態を調べた。マンガノセン分子では、A、B の 2 種類の吸着状態があることがわかり、IETS 測定により、B 種だけにおいて、マンガノ原子と炭素五員環の間の逆対称伸縮振動モードが 43meV に観測された。また、極低温 STM を用いた電子状態マッピングにおいては、劈開性が強く STM 観察に理想的な表面を容易に構築できる強相関関係を研究対象とした実験を行った。

4. 中間報告結果

4-1. 研究の進捗状況及び研究成果の現状

(1) 研究の進捗状況について

S/N が悪いながら、ラーマー歳差運動に伴うトンネル電流変化と考えられるシグナルを、STM－ESR により検出している。そして、超高真空下のシリコンに酸素を吸着させ、STM のトンネル電流変化の周波数変化を用いて、スピンのラーマー歳差運動周波数が磁場に比例して変化することを実測し、観測したトンネル電流変化がスピンに由来するピークを持つことを証明した。実験によりスピンエネルギーに幅があることが見出された事実は、本質的な物理現象を捉えている可能性があり、評価できる。位相検知型スピン信号検知システムを構築するなど、STM－ESR で単一スピンの検出が可能であることを示した装置開発は、質の高い研究として評価できる。単一スピン検出を更に確実なものにできれば科学的・技術的インパクトは大きいと考えられる。そのために必要な低温化への試みやドリフト補正についての進捗は遅れているので、これらの方法の早期導入が望まれる。

また、実験の再現性がかなり低いという事実が明らかになり、統計手法を持ち込むことにより検出結果に説得力を持たせることができたことは評価できる。さらに、統計手法が本質的な重要性をもつ可能性が示された点は新しい展開と考えてよい。

(2) 研究実施体制について

3つの研究チームは夫々独立性が高く、これらの相関性に若干の疑問が持たれる。研究の進捗状況を相互に的確且つ正確に把握して、各グループ間の情報交換を促進し、ノウハウ、技術、材料の交流を有機的に行うことが必要である。

(3) 研究費の執行状況について

STM-ESR 装置の構築には、低温化、超高真空も含めて、多額の研究費が必要であり、代表者の研究に重点が置かれ大部分の研究費が支出されているのは概ね妥当である。しかし、各グループ間の相互連携の観点から、各グループの情報共有を図るような配慮も必要である。

4-2. 今後の研究に向けて

現在、STM-ESR 装置の低温化が進められており、研究の方向は妥当と考えられる。今後は、グループ間の協力体制の連携強化を図ることで、例えばドリフトを止める技術の解決などに繋げて欲しい。またトラッキングによる観察位置の固定化や、試料位置による STM-ESR の信号特性変化の測定が可能になれば大きな成果につながると考えられる。しかし、より適切な試料を選定することの方が有効である可能性もある。例えば、スピンの数が多い試料を使えば統計を上げられる可能性がある。そのため、試料についてもチーム内で十分に検討することが望まれる。

STM をベースにした単一スピン ESR に関しては、世界的にも認められる成果が期待できる。ヒストグラム検出は評価できる一方で、単一スピン検出として実証できることが最重要課題である。単一スピンを検出する技術は将来、応用面で重要となるであろう。現時点では本研究の成果は直ちに応用に結びつかないが、長い目で見て期待できる基礎研究である。

戦略目標に向けての成果は認められるが、社会的インパクトは将来に期待したい。まずは、新規性のあるデータを国際誌に発表することを検討して欲しい。

4-3. 総合評価

概ね当初計画どおりの進捗をしており、期待する研究成果が見込める。中間評価のコメントに留意し、研究代表者の予定する今後の進め方に従って推進することが望まれる。

観測されたトンネル電流変化のピーク周波数が印加磁場に比例して変化すること、および、その周波数がラマー歳差運動周波数に対応していることから、スピンに由来するピークが観測されていることは証明されたが、低温化やドリフト補正についての進捗は遅れており、両者の早期実施が望まれる。また、これまでの観測で、スピンエネルギー自体が時間的、または、空間的に変化している可能性が見出されている。これは STM-ESR で単一スピンの検出ができる可能性を示したことになり、これらの観察を一層確実なものにすれば本課題の科学的・技術的インパクトは大きい。更なる研究進展のためには、スピン検出が容易な試料を検討することや各グループ間の連携強化により、情報交換、ノウハウ、技術、材料等の有機的な交流が望まれる。