



走査トンネル顕微鏡法と量子光学を融合した極限計測技術の開拓



研究者所属・職名：
数理物質系・教授

ふりがな しげかわ ひでみ

氏名：重川 秀実

主な採択課題：

- [特別推進研究「サブサイクル時間分解走査トンネル顕微鏡法の開発と応用」\(2017-2021\)](#)
- [基盤研究\(S\)「フェムト秒時間分解STMによる光誘起ダイナミックスのナノスケール分光」\(2015-2017\)](#)
- [基盤研究\(S\)「スピンドYNAMIXS可視化技術の開拓と新奇機能素子開発への展開」\(2010-2014\)](#)
- [基盤研究\(S\)「ナノ構造・超高速現象の解析制御と次世代新機能素子開発への展開」\(2002-2006\)](#)

分野：数物計科学、応用物理

キーワード：走査トンネル顕微鏡、ダイナミックス、極限計測、ナノ科学、サブサイクル分光、CEP制御

課題

●なぜこの研究をおこなったのか？（研究の背景・目的）

ナノスケール科学技術の進歩に伴い様々な領域で新しい世界が開拓されてきたが、一方で、そうした技術の進歩故、多くの領域で開発の限界が顕わになり、単に、これまでの方法の延長では今後の展開が難しい状況が生じている。例えば、半導体素子は機能に関わる領域が数nmのサイズに達し、特性を制御するために導入する不純物原子の位置や揺らぎが、目的とする機能に直接、影響を及ぼす段階に至っている。こうした事態を打開するには、新しい発想に基づく新しい工学の概念を導入することが必要不可欠であり、機能のダイナミックスを、高い時間・空間分解能でとらえ明らかにする新しい技術の開拓を目的とした。

●研究するにあたっての苦労や工夫（研究の手法）

原子レベルの空間分解能を持つ走査トンネル顕微鏡法(STM)とフェムト秒の時間分解能を持つ超短パルス光を利用したポンププローブ法を組み合わせることで上記目的の実現を目指した。異なる先端技術を組み合わせる場合、それぞれの要素技術を達成することに加え、各々の特徴を生み出すための技術が干渉し、新たな課題となる。中でも大きな障害となり工夫を凝らしたのは、微弱な信号を光励起に伴う探針や試料の熱膨張の影響を受けずに検出する方法の実現であった。

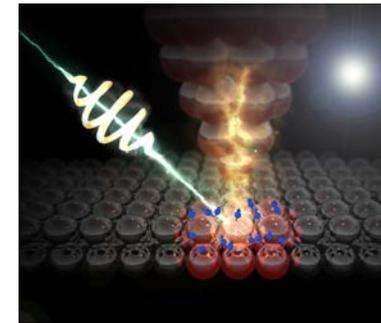


図1 光励起時間分解STMのイメージ図。



走査トンネル顕微鏡法と量子光学を融合した極限計測技術の開拓

研究成果

●どんな成果がでたか？どんな発見があったか？

光変調トンネル分光法は、光をオンオフさせながらトンネル電流—印加電圧曲線 (I - V 曲線) を測定することで、局所的な電荷分布やポテンシャルの構造を可視化することを可能にする。同手法を用い、GaAsのpn接合に注入される少数キャリアのイメージングや、内蔵電位の解析、単一原子欠陥によるポテンシャル変調のナノスケール観察などの成果を得た。更に、励起光として超短パルスレーザーを用い、光学的なポンブプローブ法の仕組みを組み合わせることで、(1)STM (原子レベル) の空間分解能で局所構造や電子状態を確認しながら、(2)フェムト秒 (光学的パルス幅) の時間分解能で分光を行うことを可能にする、新しい顕微鏡法を実現することに世界に先駆けて成功した。本手法により、例えば、GaAsのGa原子をFeやCoなどの不純物原子で置き換えた構造やナノ粒子に対し、ホール (正の電荷を持つキャリア) を捕獲する速さが原子種や粒子のサイズに依存して変化する過程を直接解析することが可能になった。ナノ粒子と基板の電荷移動は、触媒反応などにおいて重要な役割を担う。また、PIN接合における電子速度に電場が影響する様子を観察したり、励起光として円偏光を用いることで、単一量子井戸に閉じ込められたスピンの歳差運動や緩和過程の時間分解測定を行うことも可能になった。近年、パルス中の位相であるCarrier Envelope Phase (CEP)を安定して制御できるモノサイクルのパルス光をSTMと組み合わせ、フェムト秒からピコ秒の領域でトンネル電流をコヒーレントに駆動する方法が開発されたが、同手法を用いた顕微鏡法の開発を進め、過渡的な I - V 曲線の測定や、分子薄膜中のキャリアダイナミクスの観察に成功すると共に、探針により照射電場が $\sim 10^5$ 倍に増幅された近接場の波形を実験的に求める方法も確立した。

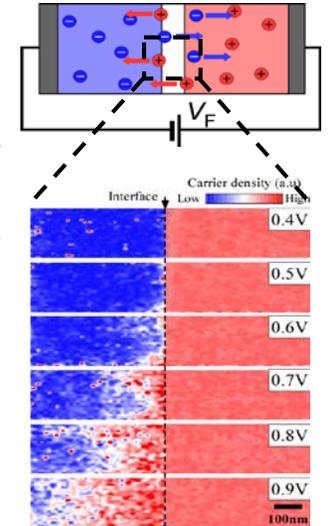


図2 pn接合でホールが注入される様子の可視化。

今後の展望

●今後の展望・期待される効果

例えば、CEP制御した新しい光源をSTMと組み合わせることで、制御された超高速ダイナミクスの途中の過程を覗き見るなど、これまで理論的にしか扱うことができなかった現象を実験的に計測する方法が実現する。現在、特別推進研究としてこうした研究を展開し、本分野の拠点とすべく、更なる試みを進めている。こうした情報は分子機能を最大限に引き出すだけでなく、全く新しい機能を発現させ活用する為の基礎となる可能性を持ち、分子マシン、触媒、創薬など幅広い応用が拓ける。また測定対象は分子に限らず半導体素子内のキャリアや相転移のダイナミクスなど多岐に亘り、新しい学術領域の創出が期待される。

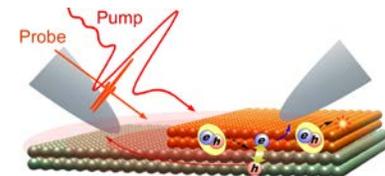


図3 サブサイクル時間分解STMの模式図。