

A04 固体素子の非平衡揺らぎ・非線形光応答：ナノ光計測による揺らぎ分光イメージング

東京工業大学未来産業技術研究所 河野行雄

物質中で発生する電荷の揺らぎは、固体素子において通常ノイズとして邪魔者扱いされるが、物質の秩序形成や相変化の根幹を担うことがしばしばある。本研究では、光応答における非平衡・非線形現象という固体物理学の基礎的かつ重要な課題に関して、揺らぎの空間構造・周波数スペクトルという視点からの研究を目的とする。具体的には、ナノスケールの局所的な光照射を基にした計測システムを創出し、固体デバイス、有機・高分子材料などにおける揺らぎ・非線形光応答の探求に応用する。この研究から、非平衡・非線形現象における特徴的な電荷分布形成・ダイナミクスやその発現の背後にある微視的メカニズムを解明することを目指した。

計測としては、空間イメージングだけでなく、ブロードバンドレーザーを用いてナノスケール空間での局所的な周波数スペクトルが測定できるシステムを構築した。これにより、空間・周波数（エネルギー）双方からの測定・解析が可能となった。試行的な実験として、酸化シリコンのフォノンに由来する光反射スペクトルをナノスケール空間で観測することができ、計測が正常に動作していることを確認した。

ターゲットとして、グラフェンのナノ光応答特性、プラズモニック構造におけるプラズモンの伝搬、導電性有機高分子の非線形伝導を主な研究対象とした。

グラフェンに関しては、光応答の空間イメージングから、光照射による非平衡状態がグラフェンの層数によって大きく異なることを見いだした（図1）。ラマン散乱測定で見られる層数ごとのグラフェンの特徴とよく一致することから、グラフェンの層数に厳密に応じたホットエレクトロン状態のナノスケール情報を得ることが可能となった。

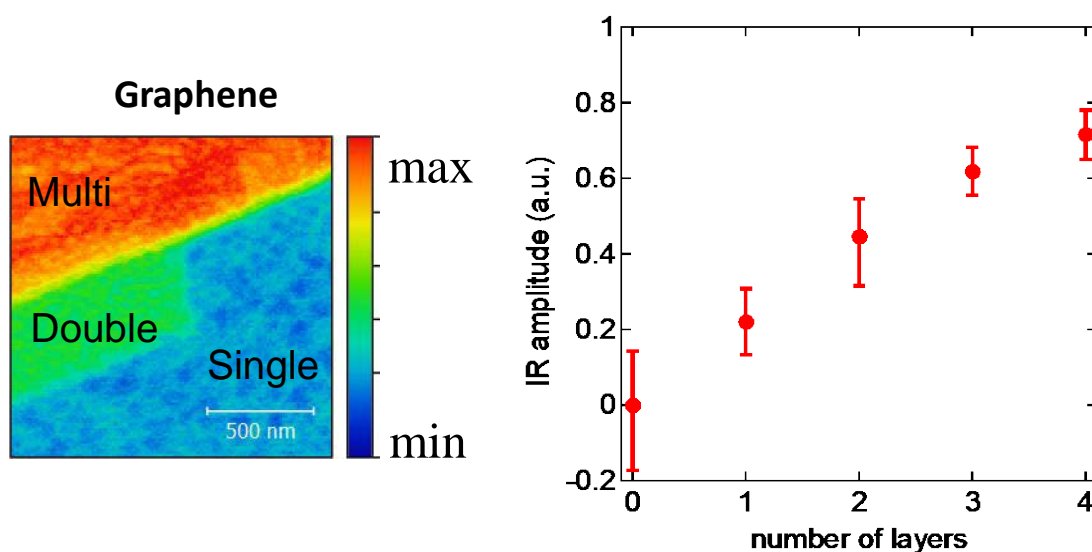


図1. (a)グラフェンの光応答のナノスケール空間イメージング。(b) (a)の光強度のグラフェン層数依存性。

プラズモニック構造については、シリコンマイクロ構造体の鋳型^{1,2)}にゴム状物質を流し込んで固める“スタンプ式”により、簡便かつ迅速に構造を作製する手法を開発した。光照射によってプラズモン由来の電界分布に明暗のパターンが出現することを観測した(図2)。電磁界シミュレーションの結果とよく一致することから、プラズモン伝搬のダイナミクスを可視化できていることを確認した。また、ナノ領域における周波数スペクトル測定により、プラズモン共鳴に基づくピーク構造を観測し、このスペクトル形状から理論的に予想される周波数との一致を見いだした。また、別の構造体(スパイラル型)に対する同様の測定も行い、構造の回転対称性を反映した特徴的な光電界・位相パターンを観測した。また、偏光子を導入することで3次元ベクトル計測を可能にした。

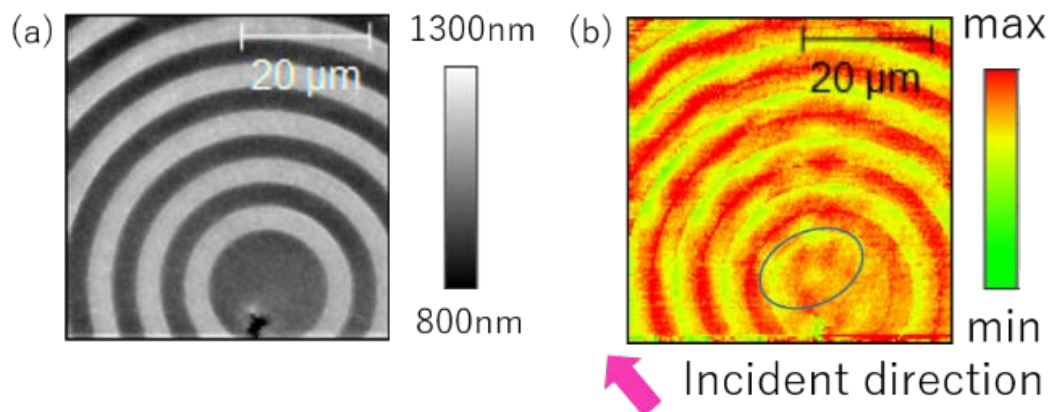


図2. スタンプ式プラズモニック構造の(a)トポ像と(b)光応答のナノスケール空間イメージング。

上記の固体素子に加えて、外場に対する応答性が高く、豊富な非線形・非平衡現象が期待される導電性有機高分子の電気伝導・揺らぎ特性について研究を行った。電気伝導の温度依存性を調べたところ、(1) 温度 200K 付近で電気抵抗の温度依存性のべき数が大きく変わる、(2) 200Kでの電流-電圧特性が急激に非線形になり、大きな揺らぎが生じる、(3) この転移点のみで光誘起による巨大な電気抵抗変化が生じる、ことを見出した。このような急な非線形性は200K付近でしか見られない。低温下(3~15K)では正の磁気抵抗が観測されたため、ホッピング伝導による機構を示している。したがって、200K付近における温度依存性のべき数変化は、ホッピング伝導を特徴づけるエネルギーや伝導状態が変わることを示唆しており、電流-電圧特性や光応答の大きな非線形性はその状態遷移に帰することが分かった。

参考文献：

- (1) T. Iguchi, T. Sugaya, and Y. Kawano, *Applied Physics Letters* 110, 151105-1-4 (2017).
- (2) X. Deng, S. Oda, and Y. Kawano, *Journal of Modeling and Simulation of Antennas and Propagation* 2, 1-6 (2016).