

「物理的手法を用いたナノデバイス等の創製」

平成 13 年度採択研究代表者

河田 聡

(大阪大学大学院工学研究科 教授)

「非線形ナノフォトニクス」

1. 研究実施の概要

光子を用いてナノ物質・ナノ構造の計測・操作・加工を行えば、他のナノプローブ・テクノロジーでは得られない興味深い効果と新たな特徴が期待できる。本研究では、近接場光学技術と非線形分光技術とを融合させた「非線形ナノフォトニクス」の基礎技術の開発と応用を目指す。特に、フェムト秒レーザー技術とプラズモン電場増強ナノプローブ作製制御技術を取り込んだナノスペクトロスコープとナノデバイス開発に取り組む。

2. 研究実施体制

分子イメージング研究グループ

① 研究分担グループ長名:河田 聡(大阪大学工学研究科、教授)

② 研究項目

蛍光標識せずに、ありのままの分子を特定し、ナノスケールでその分布を観測する手法を確立するために、非線形光学効果、振動分光、近接場顕微鏡を組み合わせた近接場 CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) 顕微システムの開発を行っている。まず、ピコ秒パルスレーザーを用いた CARS 顕微分光システム(CARS 顕微鏡)と、CW レーザーを用いた近接場増強ラマン分光システム的设计開発をそれぞれ行った。CARS 顕微鏡では、ピコ秒パルスを用いることにより、従来用いていたフェムト秒パルスに比して、高いスペクトル分解能が得られる(30cm^{-1})ことを確認した。一方、近接場増強ラマン分光システムでは、空間分解能 30nm でのスペクトル測定および分子イメージングに成功した。現在、CARS 顕微鏡と近接場増強ラマン分光システムを融合した近接場 CARS 顕微システムの開発を進めている。具体的には、1) 2台のピコ秒チタンサファイアレーザーを励起光源に用いることによる高スペクトル分解能化のためのレーザーの機種選定、2) 高効率な近接場光発生・捕集のための光学系の検討・設計、3) チタンサファイアレーザーの第2高調波を用いた電子共鳴による高感度化のための第2高調波発生光学系の設計、4) 長時間に渡る実験期間中のレーザー光の安定性の向上と5) 試料汚染を防ぐためのクリーンルームの設計(平成14年6月納入予定)、等を行った。

原子制御研究グループ

① 研究分担グループ長名:河田 聡(大阪大学工学研究科、教授)

② 研究項目

ナノ空間においてクロム原子を制御・操作する技術を確立するため、現有の超高真空チャンバーの改造を行った。とくに、蒸発温度の高いクロム原子の気体を効率よく取り出せる原子源を新たに導入した。クヌーセンセルを採用し、温度制御の最適化を図ったことで、原子ビーム流の安定化を図ることができた。また、真空チャンバー内に、半導体レーザーの第2高調波($\lambda = 425.5\text{nm}$:クロム原子の共鳴周波数に相当)を導入し、レーザー冷却によるクロム原子ビームのコリメーションを行い、原子ビームの発散角を 0.2mrad 以下に押さえることができた。今後は、原子ビームに対して勾配力を働かせることで、微細なナノ構造体の作製を試みる。

つづいて、磁気光学トラップを効率的に行うために、原子ビームの予備冷却法の検討を行った。熱蒸発させたクロム原子に対して、ゼーマン効果を利用することで光の散乱力を連続的に働かせるゼーマン冷却法が効果的であると判断し、その冷却過程を解析した。冷却器長、磁場強度分布、レーザー周波数の離調量、原子源温度等をパラメーターとして、原子の動きをシミュレートした。その結果、入射レーザー光強度をクロム原子の飽和強度($9.8\text{mW}/\text{mm}^2$)、冷却長を 1m としたときに、冷却器中で磁場を連続的に 850Gauss から 0Gauss まで変化させると、磁気光学トラップ可能な速度(18m/s)にまで冷却される原子数は、熱蒸発したクロム原子のうちおよそ 13% となり、予備冷却を行わない場合と比べて4桁以上向上することがわかった。現在、この結果から、ゼーマン冷却部の試作を行っているところである。

ナノマシン・ナノデバイス形成研究グループ

① 研究分担グループ長名:河田 聡(大阪大学工学研究科、教授)

② 研究項目

多光子過程等の非線形光学現象と近接場光学を用いて、機能性有機材料に対してナノスケールでの加工・形成を施す技術の確立を目指して、ナノスケール形状を自由に形成できる3次元超微細光加工装置の設計、開発を行った。チタンサファイアレーザーを光源として用いることで、光重合性ポリマー(ウレタンアクリレート系)を多光子吸収過程によりナノスケールで硬化させ微小構造体を作製し、その加工分解能の検証を行った。その結果、樹脂に含まれる光重合禁止剤および活性酸素分子の濃度が加工分解能に強い影響を与えることが分かった。そこで、光重合禁止剤の濃度、パルス光のピーク強度、照射時間を最適化することで、約 100nm の加工分解能を得ることができた。現在、モノマー分子のアクリル基の濃度を変化させたときの加工分解能、樹脂の重合度の変化を調べている。

細胞刺激・加工研究グループ

① 研究分担グループ長名:河田 聡(大阪大学工学研究科、教授)

② 研究項目

近赤外超短パルスレーザーを HeLa 細胞内に照射した場合に生じる Ca^{2+} 波の発生原理について調べた。光源には、チタンサファイアレーザー(波長 780nm 、パルス幅 80fs)を用いた。レーザー

からの光を対物レンズ(NA0.9)を用いて HeLa 細胞内に集光することで、 Ca^{2+} 波を発生させた。レーザー照射(照射時間 1/125 秒)後の Ca^{2+} 濃度変化を、蛍光 Ca^{2+} 指示薬(Fluo4)を用いて可視化した。レーザー照射の平均強度を 30mW~60mW まで変化させながら Ca^{2+} 波の発生確率を求めた結果、30mW の照射で約 10%程度、60mW ではほぼ 100%の発生確率が見られた。これらの光強度は焦点近傍での生体分子の破壊を起こすのに十分なものであるので、 Ca^{2+} 波発生の原因として、1)細胞膜の破壊による Ca^{2+} の細胞外からの流入、2)破壊で生じる衝撃波が細胞を機械的に刺激(メカノレセプターの関与)、3)細胞内 Ca^{2+} ストアの破壊による Ca^{2+} の細胞内への流出の3つを考案した。これらの関与を探るために薬理学的手法を用いて実験を行った結果、上記 3)の細胞内 Ca^{2+} ストアの破壊が主なイオン波発生の原因であるという結論が得られた。