

2024 年度年次報告書
物質と情報の量子協奏
2023 年度採択研究代表者

レ ハクホウトウ

産業技術総合研究所 製造技術研究部門
主任研究員

メタオプティクスを用いた単一冷却原子アレイ生成制御

研究成果の概要

今年度は、メタオブティクスを用いた単一冷却原子アレイの生成に向けて、各要素技術の開発に取り組み、提案手法の原理検証を行った。具体的には、メタ表面を用いた磁気光学トラップ (meta-MOT) および光双極子トラップ (meta-ODT) の実証に成功した。

メタ表面を用いた磁気光学トラップ (meta-MOT) では、Pancharatnam–Berry (PB) 幾何学位相型メタ構造による連続的な位相操作及び円偏光の反転特性を活用し、PB メタ構造から成る回折素子を用いた新たな MOT 方式を提案・実証した。試作したメタ表面に対して垂直な 2 方向から平行光を照射するだけで、Cs 原子の MOT 冷却を実現した。このメタ表面では、横および縦方向のトラップを形成する回折光と入射光の強度を独立に制御できるため、各方向の復元力を柔軟に調整可能である。その結果、これまで回折光を用いた MOT では困難とされていた Cs 原子の冷却を初めて実現した。このように、本手法は、MOT の光学系の簡素化・小型化に加え、幅広い原子種への冷却に対応可能な有力な原子冷却技術である。

メタ表面を用いた ODT に関しては、メタ構造から成る位相ホログラム (メタホログラム) の設計・試作を行い、それを用いた光双極子トラップ用の集光スポットアレイの形成に成功した。提案したメタホログラムは、空間光位相変調器などの従来手法と比較して構造サイズが約 1/20 と小さく、高い空間分解能を有する。このため、追加のレンズを用いることなく、平行光の入射のみで集光スポットアレイを直接生成できるという特長を持つ。具体的には、所望の集光パターンに対しては、位相最適化法を用いてメタホログラム上のメタ構造配列を設計した。試作した試料に円偏光の平行光を照射したところ、設計通りに焦点面上に近似的ガウス分布の集光スポットアレイが形成されることが確認された。さらに、従来手法で課題とされていた 0 次項による漏れ光が大幅に抑制されることも見られた。これにより、本手法は単一冷却原子の高精度な配列を可能にする光ピンセットアレイの生成と、入射光の高効率利用の両面で優れた性能を示した。

さらに、MEMS 技術を活用した超高真空デバイスおよび冷却原子生成デバイスの開発においても重要な進展があった。試作したデバイスにおいては、 10^{-6} Pa 台の高真空排気性能と長時間にわたる真空度の安定維持が確認され、提案デバイスの実現に向けた基盤技術としての有望性が示された。また、レーザー加熱による Cs 原子の放出及び放出量の制御手法の開発にも成功し、冷却原子生成デバイスの実現に向けて順調に進展している。