

【助成 39-20】

光ポンピング法によるプラズマ励起粒子時空間分布の3次元可視化

代表研究者 京都大学大学院工学研究科 助教 占部 継一郎

共同研究者 京都大学大学院工学研究科 講師 伊藤 陽介

〔研究の概要〕

本研究は、従来のプラズマ計測技術では難しい、プラズマ中の励起粒子絶対密度の時空間分布モニタリングを光ポンピングによる計測対象粒子の電子スピン偏極と外部交流磁場によるプローブ光偏光回転角計測で実現することを目的としたものである。プラズマ(励起粒子)生成と電子スピン偏極を組み合わせた数値計算モデルを構築し、計算結果から本実験に適したプラズマ生成や外部磁場印加条件について考察した。さらに、計算結果により示された計測に適した放電条件に近く、かつ測定対象のヘリウム準安定励起原子が多く生成されるプラズマが放電空間中の不純物を除去することにより得られることを実験により明らかにした。

〔研究経過および成果〕

先端プラズマ技術の更なる発展には、プラズマ状態の時空間的挙動を精密かつ高速にモニタリングする技術の確立が欠かせない。プラズマ工学において、「励起粒子絶対密度の時空間分布」は非常に重要なパラメータの一つであり、このパラメータを非擾乱かつ3次元計測することは困難であった。本研究は、研究者独自の着想による「プラズマ励起粒子の多次元可視化計測技術の実現」を目指し、「光ポンピング」という従来プラズマ計測に活用されたことのない物理現象による計測技術の実現に取り組んでいる。

上記の研究目的達成には、プラズマ中の測定対象励起粒子の電子スピンをポンプ光により偏極させ(光ポンピング)、外部磁場と偏極した電子スピンの相互作用により生じる磁気光学効果を計測する必要がある。そこで、本研究では従来のプラズマ科学の枠組みに電子スピン偏極という新たな現象を取り入れ、活用するための基礎研究を計算・実験の両面から行った。

光ポンピングとは、円偏光のポンプレーザー光により対象粒子の電子スピンを偏極させる(式(1))ことであり、そのスピン偏極方向が外部磁場によって傾き、結果としてポンプ光と直交な直線偏光プローブレーザー光の偏光面が回転する。(式(2))このプローブ光の偏光回転角から、磁場強度もしくは測定対象粒子密度を計測することができる。

$$\frac{d}{dt}\mathbf{S} = \gamma\mathbf{S} \times \mathbf{B} - \frac{1}{T_2}\mathbf{S} + \frac{R_{OP}}{2}\mathbf{S}_z \quad (1)$$

(\mathbf{S} : スピン偏極, γ : 磁気回転比, \mathbf{B} : 磁場, T_2 : 緩和時間, R_{OP} : ポンピングレート)

$$\theta = ncr_e f \frac{\nu_{probe} - \nu_0}{(\nu_{probe} - \nu_0)^2 + (\Gamma/2)^2} l_{cross} \mathbf{S}_z \quad (2)$$

(θ : 偏光面の回転角, n : 粒子密度, r_e : 古典電子半径, f : 振動子強度, ν_{probe} : プローブ光周波数, ν_0 : 共鳴周波数, Γ : 線幅, l_{cross} : 計測部の長さ)

本研究では、ある放電条件と外部磁場印加条件において、光ポンピング(スピン偏極)によるプローブ光偏光回転角がどのような値となるか、数値計算によっ

て推定可能な手法開発に取り組んだ。具体的には、ヘリウムガスプラズマ中の準安定励起原子 (He^m) 生成および失活を純 He ガス中の 0 次元グローバルモデルにより数値計算し、得られる He^m の密度と寿命から、ある交流外部磁場印加条件におけるプローブ光偏光回転による検出光強度変化を計算した。その結果、現在想定している放電条件では、交流磁場周波数が 250 Hz 以下の範囲で高感度な偏光回転計測が可能であることが示唆された。(図1, 発表論文1)

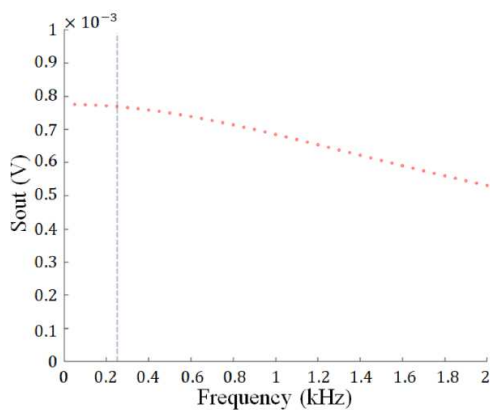


図1：数値計算により得られた He^m スピン偏極によるプローブ光偏光回転角に対応する検出光強度 (S_{out}) と外部交流磁場周波数の関係

この数値計算研究から、10 分の 1 気圧 (10 kPa) 程度の He ガス条件にて He^m 原子を高密度生成することが、本計測の信号検出に有効であることが示された。そこで、この圧力領域で He^m 失活の主要因となる He ガス中の分子性不純物を除去し、理想的な数値計算に近い実験条件を実現するための研究を行った。高純度 He ガスをガラス管に供給し、ガラス管内で誘電体バリア放電によりプラズマ (He^m 原子) を生成した。不純物の低濃度化を目的として、ガス供給系の見直しや、He ガス精製器の導入を行った。図 2 に示す通り、ガス精製器の導入により He^m 原子密度が 2 倍程度に上昇し、不純物による He^m 失活抑制が達成されて

いる。この実験で得られた 10^{13} cm^{-3} という He^m 密度は数値計算で得られたと同等のものであり、光ポンピングによる He^m 計測に適した放電条件であると言える。(発表論文 2)

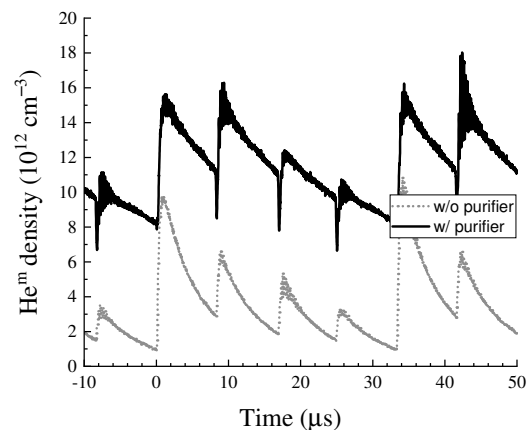


図2：レーザー吸収分光実験により得られた He^m 密度の時間変化。He 精製器導入により 2 倍程度の He^m 高密度化が実現できた。

以上で得られた光ポンピングによる He^m 密度計測に適した外部交流磁場や放電条件を活用し、3 次元空間分布計測を行うための実験システム構築を現在行っている。

[発表論文]

1. 日高 颯哉, 伊藤 陽介, 占部 継一郎, 「光ポンピング磁気センサへの応用に向けた準安定励起ヘリウム原子の密度及び寿命に関する検討」, 第 83 回応用物理学学会秋季学術講演会 (仙台, 2022 年 9 月), 22p-A404-15.
2. K. Urabe, M. Toyoda, Y. Matsuoka, and K. Eriguchi, 「Quantification of molecular impurity ratio in high-pressure helium dielectric barrier discharge by laser absorption spectroscopy」, 75th Annual Gaseous Electronics Conference / 11th International Conference on Reactive Plasmas (Sendai, Oct. 2022), HW6.00048.