

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21864

研究課題名（和文）プラズマ励起粒子の量子状態制御による励起粒子絶対点密度測定と超高感度磁気測定

研究課題名（英文）Absolute-density measurement and precision magnetometry using quantum-state control of plasma excited species

研究代表者

占部 継一郎 (Urabe, Keiichiro)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：80725250

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、従来技術では困難であった「プラズマ励起粒子の絶対点密度測定」と「極微小磁場強度の室温環境下での測定」の2つの目標に対して、「ヘリウム準安定励起原子の光ポンピング」を活用した実験的アプローチで迫る研究である。従来の関連研究にて問題点が指摘されてきたヘリウムプラズマ中の準安定励起原子高密度生成を実現するために、放電に用いるヘリウムガスに含まれる低濃度不純物に着目した実験研究を行い、今後の高密度化の指針になる研究成果を得た。並行して、ヘリウムプラズマを利用した光ポンピング計測系の最適化に関する検討を進め、磁気遮蔽箱の設計・製作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、プラズマを利用した微細加工等のナノテクノロジー分野（プラズマ計測）と、脳機能（生体磁場挙動）を理解するライフサイエンス分野（微小磁場計測）の課題に対し、1つの実験系で革新的な発展をもたらすことを目標とした野心的な研究である。プラズマ応用や反応性粒子可視化技術を切り拓く先端計測としてヘリウムプラズマの光ポンピングが位置づけられると期待している。本研究は、特に2020年度に新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、機器調達や共同実験が延期・中止となり研究の進捗に支障が出た。研究期間終了後も鋭意研究を進め、当初の目標を達成し、科学技術と社会の発展に貢献する計画である。

研究成果の概要（英文）：This study has two targets of "absolute point-density measurement of plasma excited species" and "extremely low magnetic field measurement at room temperature". Our approach for the targets is to utilize optical pumping of helium metastable excited species generated by gas discharge. We found a way to optimize helium metastable density for the optical pumping from experimental investigation of low-concentration impurities in helium discharge gas. In addition, we fabricated a magnetic-field shielding box designed for the experiments inserting the helium gas discharge system.

研究分野：プラズマ応用科学

キーワード：光ポンピング プラズマ 磁気強度計測 励起粒子密度計測

## 1. 研究開始当初の背景

光ポンピング磁気計測は生体内の微小磁場計測を主な応用対象として研究開発が進んでいる先端光計測技術であり、アルカリ金属蒸気(高温)の電子スピン偏極が主に用いられてきた。しかしながら、光ポンピング自体はこれまでに様々な粒子を対象に行われた実績があり、プラズマにより生成するヘリウム準安定励起原子( $\text{He}^m$ )を利用することも可能である。この $\text{He}^m$ 光ポンピング磁気測定は、宇宙空間中の磁場計測に応用された例があり[1]、近年は生体磁気計測応用の実現に向け本課題の研究分担者(伊藤)[2]とフランスのグループ[3]が別個に取り組んでいる。高温で気化したアルカリ金属原子の光ポンピングや、極低温超電導デバイスである SQUID という従来の超高感度磁気測定技術に対し、 $\text{He}^m$ 光ポンピングは「室温動作可能」という優位性があるものの、磁場感度の不足により実用化に至っていない現状にある。

一方、プラズマ計測は半導体デバイス作製時のプラズマ微細加工の診断・最適化など様々なプラズマ工学分野において不可欠な技術である。電氣的・光学的手法を中心にこれまでに様々な計測手法が開発されてきたが、「プラズマ内部に存在する励起粒子の絶対点密度」の測定は非常に困難であった。今回活用する光ポンピング法は、磁場計測であると同時に、既知の磁場強度条件においてはポンプ・プローブ光が交差する微小領域(点)におけるポンピング対象粒子密度計測であると考えることが出来る。そのため、研究代表者らはこの光ポンピング法を磁場計測だけでなくプラズマ計測にも展開・応用可能な計測技術と新たに位置づけ、研究を開始した。

## 2. 研究の目的

本研究は、最先端工学分野にて実現が求められるものの従来技術の連続的發展では困難な  
(1) プラズマ励起粒子の「絶対点密度」計測 --- [最先端半導体工学・ナノテクノロジー]  
(2) 生体磁気などの極微小磁場強度を「室温下」で計測 --- [最先端医療・健康工学]  
を、【ヘリウム( $\text{He}$ )準安定励起原子の量子状態(電子スピン偏極)制御】で実現する。この計測は、プラズマ中に発生する $\text{He}^m$ の電子スピンを偏極させる光ポンピング(エネルギー準位の超微細構造制御)と、外部磁場によるスピン偏極回転に対応したプローブ光偏光の磁気光学回転(光・磁気・電子スピン相互作用)を活用し、極微小磁場強度( $\text{He}^m$ 密度が既知)、もしくは $\text{He}^m$ 絶対点密度(外部磁場が既知の場合)を測定する。

まず、本研究では現状では不足している磁場感度を $\text{He}^m$ 光ポンピング磁気測定に最適化設計した新たなプラズマ源で飛躍的に向上させる。また、 $\text{He}^m$ 密度と外部磁場強度の制御により、磁場と密度のダイナミックレンジを意図的に調節した計測が可能になる。本研究では単一のプラズマ源で生成可能な $\text{He}^m$ 密度レンジの最大化し、磁場強度計測技術の向上を目指す。

また、 $\text{He}^m$ 光ポンピングを今回新たにプラズマ励起粒子診断に応用し、従来法では計測困難な励起粒子の絶対点密度取得を実証する。これにより、最先端半導体・ナノ工学で喫緊の課題であるプラズマプロセスの時空間的ばらつきの評価・制御への応用可能性を検討する。

## 3. 研究の方法

本研究の目的である $\text{He}^m$ 直交ポンプ・プローブ磁気測定実験における、 $\text{He}^m$ 原子スピン偏極(光ポンピング)と、プローブレザー光の磁気光学回転現象を次ページ図1(a)に示す。量子現象を制御するポンプ(z軸)・プローブ(x軸)レーザーと3次元磁場制御コイルからなる実験系(図1(b))をデザインした。 $\text{He}^m$ 発生と密度計測実験用のプラズマセルは磁気遮蔽箱に収め、地磁気等の外部磁場の影響を抑制する。

$\text{He}^m$ 発生用のプラズマ源には低真空～大気圧 $\text{He}$ ガス中の交流放電(kHz)を用いる。この条件では以前の研究例から $10^{11}\sim 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ 程度の $\text{He}^m$ 生成となることが分かっている。[4] 本研究の光ポンピング磁気測定では、ポンピングする粒子の密度が高いほど磁気測定感度が向上する。そこで、本研究では高密度 $\text{He}^m$ 生成のため、低真空～大気圧領域での $\text{He}^m$ 密度(寿命)の主な決定要因である放電ガス中の不純物粒子に着目した。この圧力領域での不純物導入要因について詳細に検討するとともに、 $\text{He}$ ガス純度を可能な限り高めた状態で放電セルに導入し $\text{He}^m$ 密度計測を行う。

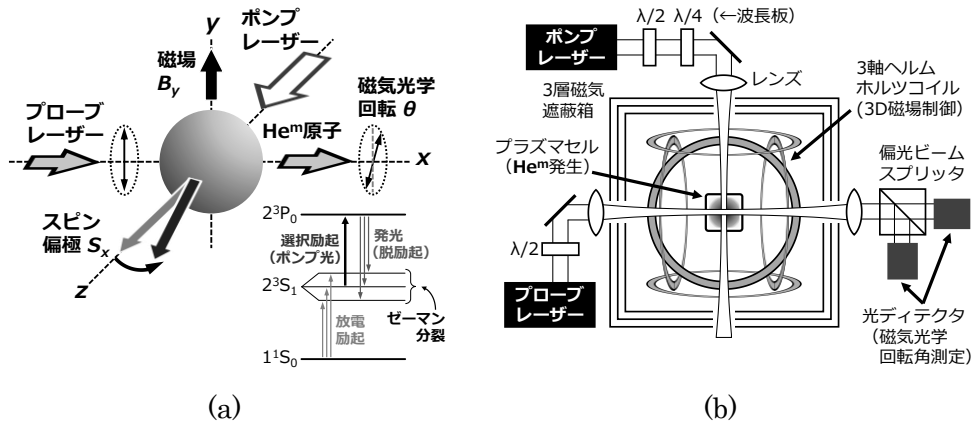


図 1: (a) 本研究で用いるスピン偏極・磁気光学回転の原理と He 原子エネルギー準位図  
(b) He<sup>m</sup> 電子スピン偏極制御と磁気光学回転角測定の実験系概要図

#### 4. 研究成果

本研究では、まず誘電体バリア放電 (DBD: Dielectric Barrier Discharge) と呼ばれる低真空～大気圧交流放電手法を用いて生成した He<sup>m</sup> の挙動をレーザー吸収分光法により計測した。He ガスを放電部であるガラス管に導入する配管部分 (バルブ・流量調節器含む) に対して、区画毎の外部リークテストを行い、すべての放電条件において外部リークによる空気混合率が 5 ppm 未満であることを確認した。その後、He ガス流量とガラス管内のガス圧力を変化させ、各条件における He<sup>m</sup> 寿命を計測した。(図 2(a)) この結果は一定量の外部リークではない不純物粒子源の存在を表しており、発光分光法による不純物同定から水分子が主な不純物であることが示唆された。放電中の不純物が全て水分子であると仮定して、図 2(a) の He<sup>m</sup> 寿命から H<sub>2</sub>O 混合比を計算しプロットしたものが図 2(b) である。この H<sub>2</sub>O 混合比の流量・圧力依存性は、配管内に多層吸着した水分子が脱離・拡散し、He 層流により輸送される物理モデルにより説明できることが分かった。これらの実験・解析結果により、高気圧放電中の低濃度不純物量決定要因とその制御手法について検討を進め、He<sup>m</sup> 高密度化の指針を得ることができた。

上記の放電計測実験と並行して、この放電を磁気遮蔽箱に導入し、光ポンピング磁気測定と He<sup>m</sup> 絶対点密度測定を行うための検討を進めた。従来のアルカリ蒸気を用いた計測とは異なり、He<sup>m</sup> を用いる光ポンピング実験には、放電生成用ガスや交流高電圧の導入など考慮しなければならない要件が多い。研究代表者 (占部) と分担者 (伊藤) は必要な変更点を整理し、He<sup>m</sup> の光ポンピング実験に最適な磁気遮蔽箱を設計・製作した。

本研究は、特に 2020 年度に新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、実験機器の調達と研究代表者・分担者間の連携 (共同実験) に大きな支障があった。機器調達や代表者と分担者それぞれの研究室での準備実験は研究期間中に十分進んでおり、今後も共同して本研究を進め共同実験が可能になった後に最終的な研究目標を達成するための実験を行う計画である。

#### References:

- [1] 例えば I. Fratter et al., *Acta Astronautica* **121**, 76-87 (2016).
- [2] Y. Ito and T. Kobayashi, 11th APCST and 25th SPSM, 3-P59 (Oct 2-5, 2012, Kyoto).
- [3] S. Morales et al., *Physics in Medicine & Biology* **62**, 7267 (2017).
- [4] 例えば K. Urabe et al., *Plasma Sources Science and Technology* **23**, 064007 (2014).

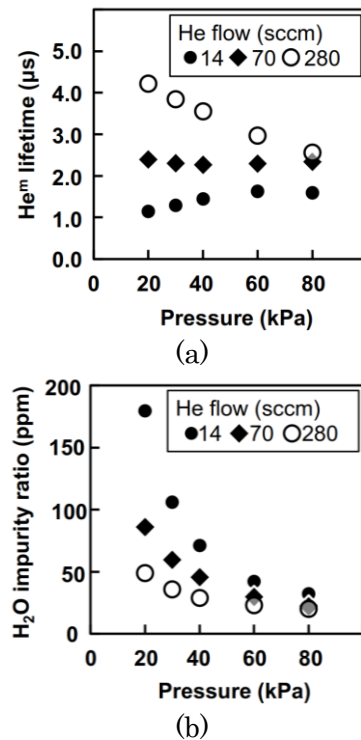


図 2: (a) レーザー吸収分光法により得られた He<sup>m</sup> 寿命の流量・圧力依存性. (b) 放電中の不純物粒子が水分子であると仮定し計算した場合の H<sub>2</sub>O 密度の流量・圧力依存性.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 占部 継一郎
2. 発表標題 マイクロプラズマ研究が創出した連携研究の機会と可能性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 占部 継一郎
2. 発表標題 高調波干渉計を用いたプラズマ電子密度診断の現状と課題
3. 学会等名 第146回日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 陽介, 小林 哲生
2. 発表標題 光ポンピング磁気センサの開発と生体磁気計測への応用
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者（占部） 研究室Webpage <a href="http://www.propulsion.kuaero.kyoto-u.ac.jp/">http://www.propulsion.kuaero.kyoto-u.ac.jp/</a> 研究代表者（占部） 個人Webpage <a href="https://sites.google.com/site/keiurabe0907/">https://sites.google.com/site/keiurabe0907/</a>  研究分担者（伊藤） 研究室Webpage <a href="https://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/">https://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	伊藤 陽介  (Ito Yosuke)  (20589189)	京都大学・工学研究科・講師    (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------