

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17478

研究課題名(和文)真空紫外域での単一原子分光に関する研究

研究課題名(英文) Development of a vacuum ultraviolet optical system for state detection of single trapped ions

研究代表者

和久井 健太郎 (Wakui, Kentaro)

国立研究開発法人情報通信研究機構・経営企画部企画戦略室・プランニングマネージャー

研究者番号：90536442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：短波長コヒーレント電磁波の生成は既にX線領域に達するが、その単一原子系との相互作用の実験的研究は深紫外領域に留まっている。真空紫外領域での単一原子分光が実現すると、量子電磁気力学の高精度検証、核遷移を用いた光周波数標準など、新規の応用へ道が拓ける。我々は平均出力数 μW (マイクロワット)のコヒーレント真空紫外光を実験的に生成し、それにより単一原子を励起した際の蛍光観測レートを具体的に見積もることで、光学系の損失等を考慮しても単一原子の真空紫外分光が実現可能であることを示した。この実現に向け、本研究では真空紫外光を単一原子へと高効率に集光し、励起原子からの蛍光を高効率に結像できる光学系を開発した。

研究成果の概要(英文)：Although the generation of coherent electromagnetic field has already reached the X-ray region, experimental studies on the interaction with single atomic systems remain in the deep ultraviolet region. When spectroscopy for such single atoms in the vacuum ultraviolet region is realized, the path to new applications such as high-precision verification of quantum electromagnetics and optical frequency standard using nuclear transitions could be opened up. We experimentally generated coherent vacuum ultraviolet light with an average power of a few μW (micro watt), and concretely estimated a detection rate of fluorescence from a singly trapped ion excited by the vacuum ultraviolet light, by taking into account the loss of the optical system. In order to realize this configuration, in this research, we developed an optical system that can efficiently focus vacuum ultraviolet light to a single atom and can image fluorescence from excited atoms with high efficiency.

研究分野：量子光学、光周波数コム

キーワード：真空紫外 高次高調波発生 イオントラップ

1. 研究開始当初の背景

近年、受動共振器を用いた高次高調波生成により、コヒーレンスのよい真空紫外・極端紫外周波数コムを生成することが可能となった[1]。また、これらを用いることで、自由空間に放出された希ガス原子の真空紫外・極端紫外領域における直接分光も実現している[2]。一方、レーザー冷却された単一原子と短波長コヒーレント電磁波との相互作用の実験的研究は、未だ深紫外領域に留まっている。真空紫外領域においては、とりわけインジウムイオン($^{115}\text{In}^+$)の $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ 遷移(波長 159 nm, 図 1a)やアルミニウムイオン($^{27}\text{Al}^+$)の $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ 遷移(波長 167 nm)[3]、トリウム(^{229}Th)の核遷移(波長 67 - 197 nm)[4]などが、高確度の次世代光周波数標準の実現や、量子電磁気学の高精度検証に向けて重要である。しかしながら、これらを含むいかなる原子・イオン・原子核の真空紫外遷移に対しても、ドップラー広がりのない条件下での精密分光は実現されておらず、現在までに未踏の課題となっている。

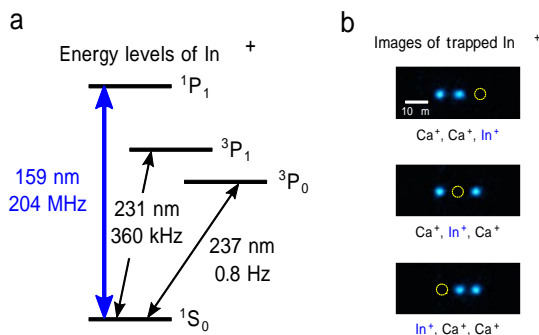


図 1. a In^+ イオンのエネルギー準位
b Ca^+ との共同冷却により捕獲された In^+

2. 研究の目的

このような単一原子に対する精密分光を真空紫外領域で実現するため、申請者らのグループでは共同冷却によるインジウムイオンのトラップ技術を開発するとともに[5] (図 1b)、Xe ガスを用いた高次高調波生成による 159 nm 真空紫外光源(真空紫外コム)生成技術の開発を進めてきた[6]。我々の手法ではチタンサファイアレーザーによる周波数コム(中心波長 795 nm)を外部共振器で増強し、コム構造を保ったまま 5 次高調波生成を行う。さらに、我々はダイクロミックミラー方式で真空紫外コムのみを効率的に取り出せるアウトプットカップラを開発し(図 2)、これまでに 6 μW の真空紫外コムを光共振器外の光学パスへ取り出すことに成功している。

この外部共振器増強方式で実現できる真空紫外コムには、
・パルス繰り返し周波数が高く(>100 MHz)疑

似的な連続波である

・空間モードが単一ガウシアンであり、空間的なコヒーレンスが良い

といった大きなメリットがある。このことから、我々の真空紫外コムは回折限界で設計した顕微鏡光学系の照明としても用いることができる。

そこで、我々は現実的な実験条件を仮定し、既存技術で実現できる集光光学系や蛍光検出系の効率を検討した。その結果、我々の真空紫外コム(平均パワー 6 μW)を単一インジウムイオンに導波・集光し、励起されたイオンからの蛍光を検出した場合、500 cps (counts per second) 以上の蛍光観測レートが得られることが明らかになった[6]。この値は単一イオンの状態観測が可能なレートである[7]。

以上の背景・予備調査に基づいて、本研究では真空紫外コムを捕獲単一インジウムイオンに効率よく集光し、さらにイオンからの蛍光を検出器に導波させるための光学系の開発を行った。

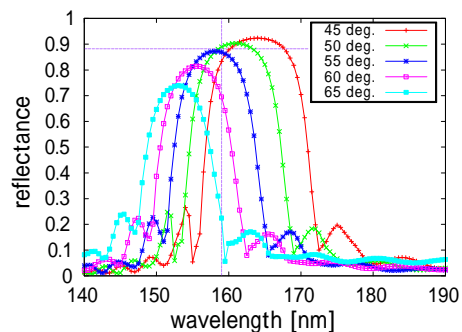


図 2. 真空紫外コム用アウトプットカップラの反射率測定結果

3. 研究の方法

本研究では、真空紫外コムを空間的に局在した捕獲単一インジウムイオンに効率よく集光し、さらに励起されたイオンからの蛍光を検出器に導波させるため、まず各種の真空紫外用光学素子を作成し、個々の反射率、透過率などを評価した。次に、光学系を真空槽内に構築し、光学系の性能評価を行った。

4. 研究成果

まず、光源側では、高次高調波生成の際の基本波となるチタンサファイア発振器の性能向上に取り組んだ。具体的にはチタンサファイア結晶の励起条件や発振器後のパルス圧縮器の最適化を行うことにより、当初得られていた平均出力 700mW、パルス時間幅 65fs から、平均出力 >1W、パルス時間幅 <40fs の性能を実現している。これらの基本波における性能向上によって高次高調波の出力も向上し、研究開始当初は 6 μW であった真空紫外

コム平均強度を 10 μW 以上まで高強度化させることに成功している。

さらに、生成直後の真空紫外コムビームのモードを実測から、コリメート・集光が可能であることを確認した。出射直後の真空紫外ビームのモードプロファイルを図 3 に示す。

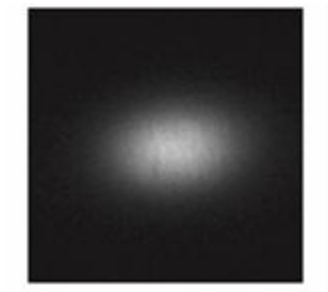


図 3. 真空紫外コム空間モードプロファイル：生成部の収差のため楕円となっているが、縦横方向ともに単一のガウシアン分布を持ち、直径 2mm 程度でコリメートされたビームが得られている。

次に、図 4 では本研究で構築した真空紫外光学系の全体像を示す。光源側(図 4 左側)で生成された真空紫外コムは、より高真空のイオントラップチャンバー(図 4 右側)へと導波される構成となっている。

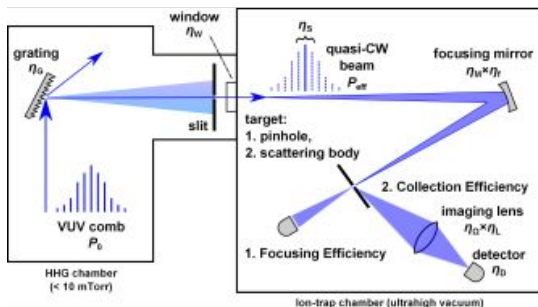


図 4. 構築した真空紫外光学系の概要：真空紫外コムをイオンに導波・集光する光学系、単一イオンからの蛍光を検出器に集光する光学系で構成されている。

図 4 において、回折効率 G で表されるグレーティングは、真空紫外コム縦モードを狭帯化する役割を持つ。フッ化マグネシウムの窓材(透過率 W)は、真空紫外生成用チャンバーとイオントラップチャンバーを分離するために用いる。 S (スペクトル占有率)は真空紫外コムの本数の逆数であり、コム全体の平均パワーとコム 1 本のパワーの比率である。(我々の真空紫外コムは S は約 5×10^{-6} と見積もられている。)このように取

り出されたコム成分は、反射率 M の凹面ミラーを用いてイオンへと集光される。集光ミラーは曲率半径 -100 mm の凹面鏡、レンズは焦点距離 50 mm の平凸レンズである。凹面鏡には高反射コーティング、レンズには無反射コーティングを施した。また、どちらにも ArF グレードの CaF_2 基板を選定し、159 nm での損失を可能な限り低減した。この凹面ミラーで集光したガウシアンビームのモードプロファイルでは、ミクロンオーダーのモード直径が得られることが予想される。正確な実測値は測定ターゲットを工夫するなどしてさらなる精密評価が必要であることが判明しているが、これまでの評価結果では概ね設計通りの値が得られていると予想されている。ここで、凹面ミラーの表面精度がモード波面に与える擾乱も考慮すると、実際に目標の領域に集光されるパワーは、凹面ミラーへの入力に対して 80% 程度(集光効率: f)と見積もられている。また、イオンからの蛍光は有限の立体角()で、フッ化マグネシウムのレンズ(L) を用いて検出器に集光される。検出器の量子効率(D)では、真空紫外域に感度を持つ商用の検出器(ホトマル)の量子効率を実測した。

真空紫外コム強度増強、試作した集光用の凹面鏡等のミラー類の反射率、レンズ等の透過光学素子の透過率等といった、本研究で得られた諸特性に関する主な結果を示す(表 1)。

内容	記号	実測値・推定値等[6]	本研究成果
真空紫外コム強度 [μW]		6	>10
窓透過率	W	0.85	>0.95
ミラー反射率	M	0.95	>0.95
結像レンズ透過率	L	0.85	>0.95
検出器量子効率	D	0.15	~0.15

表 1. 本研究での実施結果のまとめ：真空紫外コム強度が向上し、真空紫外光学素子においても当初の推定より高い性能が得られている。

以上、本研究の成果から、研究開始当初に得られていた見積もり[6]がさらに上方修正され、我々の構築した光学系を用いて単一インジウムイオンを励起した場合 1,000 cps 以上の蛍光検出レートの実現も不可能ではないことが明らかとなった。

最近になって、単一インジウムイオンの共同冷却技術に基づいた時計遷移の励起・観測も報告されており[8]、高次高調波発生から

得られる真空紫外コムを用いた単一イオン量子状態射影測定的重要性・実現可能性は、ますます高まっている。

参考文献

- [1] Jones et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 193201 (2005); Gohle et al., Nature **436**, 7048 (2005).
- [2] Cingöz et al., Nature **482**, 68 (2012); Ozawa and Kobayashi, Phys. Rev. A **87**, 022507 (2013).
- [3] Dehmelt, IEEE, Trans. Instrum. Meas. **IM-31**, 83 (1982).
- [4] von der Wense et al., Nature **533**, 47 (2016).
- [5] Hayasaka, Appl. Phys. B **107**, 965 (2012).
- [6] Wakui, Hayasaka, and Ido, Appl. Phys. B **117**, 957 (2014).
- [7] Wang et al., Opt. Commun. **273**, 526 (2007).
- [8] N. Ohtsubo et. al. Opt. Express, **25**, 11725 (2017).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3 件)

1. “High harmonic generation towards quantum projection measurement for single trapped ions at vacuum ultraviolet”,
K. Wakui, K. Hayasaka, T. Ido
9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUAX) 2017年1月9日) 京都大学(京都府、京都市)
2. “Optical Clocks at NICT”,
Y. Li, H. Hachisu, K. Matsubara, N. Ohtsubo, K. Hayasaka, M. Fujieda, M. Kajita, S. Nagano, M. Kumagai, K. Wakui, and T. Ido
The 7th International Symposium on Cold Atom Physics (ISCAP-VII) (2016年6月20日) 浙江省杭州市(中国) 招待講演
3. “単一捕獲イオンの真空紫外量子射影測定に向けた高次高調波発生”,
和久井健太郎, 早坂和弘, 井戸哲也
第34回量子情報技術研究会(QIT34) (2016年5月30日) 高知工科大学(高知県、高知市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和久井 健太郎 (WAKUI, Kentaro)

国立研究開発法人情報通信研究機構・経営企画部・企画戦略室・プランニングマネージャー

研究者番号: 90536442