

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610122

研究課題名(和文) アルカリ含有ガラスで実現するレーザー冷却実験用小型セル

研究課題名(英文) Compact cell made of alkali-doped glass for laser cooling experiments

研究代表者

畠山 温 (Hatakeyama, Atsushi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70345073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：アルカリ金属原子を含有したガラスの表面状態や、そこからの光誘起脱離の特性について、系統的に調査し、石英ガラスとピレックスガラスでの違いを明確にした。レーザー冷却実験に応用できる光誘起脱離レートを達成できるアルカリ金属含有ガラス材料は実現できなかった。ガラス材料にこだわらず、PDMSなど容器の内側にコーティングする材料であれば、高い光誘起脱離レートを室温で実現できる可能性はあると考えるが、十分な検証までにはいたらず、今後の課題である。

研究成果の概要(英文)：We systematically investigated the surface conditions of glasses doped with alkali-metal atoms and the properties of light-induced desorption from those surfaces. We found clear differences between quartz glass and Pyrex glass. Alkali-doped glass materials could not be realized that enabled high light-induced desorption rates for applications to laser cooling. There may be some possibilities of obtaining high desorption rates at room temperature using coating materials such as PDMS, and further studies will be required.

研究分野：原子分子光物理

キーワード：原子 表面 脱離 レーザー冷却

1. 研究開始当初の背景

気体原子の光精密計測実験、特にレーザー冷却実験は、時間反転対称性の破れの検証や18桁の精度を持つ時間標準など多くの基礎物理学研究で極めて有用である。一方、その高いポテンシャルを利用した応用展開については、小型周波数標準、磁力計、重力計、量子情報処理など、期待されている技術は多いものの、実用化はまだ極めて限られている。理由は簡単にいうと装置が複雑でシステムの堅固さが不足しているためである。必要なシステムは光学系と真空系に大きく分けられる。光学系の単純化と堅固化については、回折格子を巧みに使い真空容器(セル)の表面付近で大量の気体原子をレーザー冷却し捕獲した実験結果が、有望な手法として最新の論文で報告されている(Nshii *et al.*, *Nature Nanotechnology* **8**, 321(2013))。一方、真空系では、気体原子の容器を超高真空中に保ち、必要ときにサンプル原子(主にアルカリ金属原子)を供給する機構が複雑なことが小型化や簡略化を困難にしている。

2. 研究の目的

本研究では、申請者がこれまでの研究で見出したアルカリ含有ガラスからの光誘起脱離現象を用いることにより、レーザー冷却実験などで使われる超高真空アルカリ蒸気セルを単純化かつ堅固化し、多くの原子精密計測実験とその応用に貢献することを目的とする。この目的の実現のために、次の2つの具体的な目標を掲げる。

(目標1) 光誘起脱離のメカニズムを理解し、室温において十分な光誘起脱離レート達成できるガラス材料を開発する。供給レートの目標値は 10^{11} 個/s で、ガラス温度 300°C においてはすでに達成している。

(目標2) 開発したガラスを用いて真空セルを製作し、その中に光誘起脱離で気体原子を供給する。その気体原子に対してレーザー冷却をデモンストレーションする。ガラス表面や脱ガスの分析を行い、究極的には真空ポンプを接続しない封じきりセルを目指す。必要とされる真空度は 10^{-6} Pa である。

3. 研究の方法

目標1の達成のため、室温において 10^{11} 個/sの供給レートが可能でガラス材料を開発する。ガラス基板にアルカリ金属を含有させ、その表面分析と光脱離測定を行う実験を繰り返すことで、目標達成のために重要な条件を明らかにする。続いて、目標2の達成をめざす。開発したガラスを用いて真空セルを製作し、その中に光誘起脱離で気体原子を供給する。その気体原子に対してレーザー冷却をデモンストレーションする。作製したガラス材料の表面やそこから脱ガスの分析を行

い、究極的には真空ポンプを接続しないで 10^{-6} Paの真空度が可能な封じきりセルを目指す。

4. 研究成果

○アルカリ含有ガラスの表面状態と光誘起脱離の特性の基礎研究

アルカリ含有ガラスからの光誘起脱離現象を理解するため、ガラス基板にアルカリ金属を堆積させて、表面分析実験と光誘起脱離実験を行った。ガラス材料としては、アルカリ金属蒸気セルによく用いられる石英ガラスとパイレックスガラスを用いた。アルカリ金属としてはルビジウムを用いた。

X線光電子分光(XPS)によって表面分析したところ、ルビジウムを堆積した石英とパイレックスでは表面状態が明らかに違うことがわかった。図1にルビジウムのXPSスペクトル線を示す。パイレックスと石英で明らかに異なることがわかる。つまり、ルビジウムは2種類のガラス表面で異なる結合状態をとっている。さらに、角度分解XPS法により、パイレックスは石英に比べて、ガラス内部に深くルビジウムが浸透していることも明らかになった。

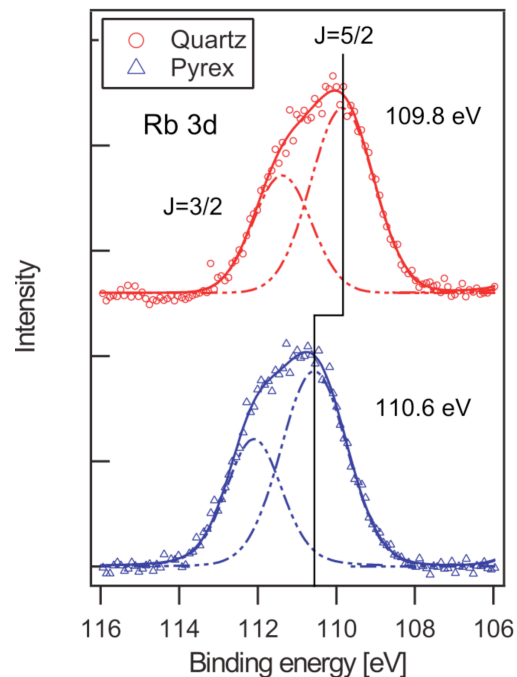


図1 XPSスペクトル (Rb 3d)

このような表面に対して、光誘起脱離測定を行ったところ、石英とパイレックスの脱離特性、具体的には脱離レートの時間経過、光波長依存性、温度依存性に明確な違いが観測された。これらは上述したような表面状態の違いに起因しているものと推測できる。特に温度依存性では、石英はパイレックスに比べて、高温において顕著な脱離レートの増加を認めた(図2)。この結果は、申請者が、アル

カリ含有ガラスからの光誘起脱離の研究の過程において見いだしていた事実、つまり、石英ガラスにルビジウムを含有させたほうがパイレックスガラスとは異なり高温において光誘起脱離が観測されるという事実と一致している。ただ、この実験結果は逆に、室温において高温ほど十分な脱離レートを得ることが、少なくともこの2つのガラス材料では難しいことを明示している。

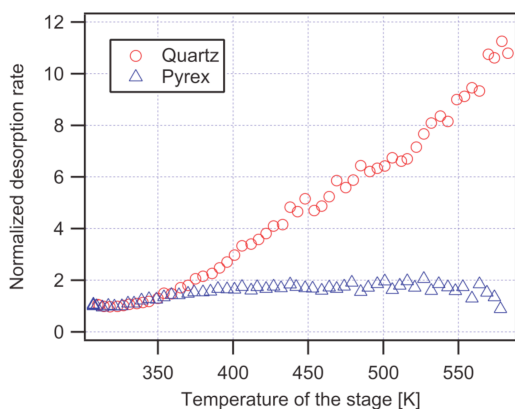


図 2 : 光誘起脱離の温度依存性

○アルカリ含有ガラスの合成

上記の実験結果からも裏付けられた通り、従来行ってきた、既成のガラス材料に後からアルカリ金属を含有させる方法では、高温ではともかく、室温では、狙いとするレーザー冷却実験に応用できる十分な脱離レートの確保は困難であるとの結果を得た。そこで、ガラスの製造段階で大量のアルカリ金属を含んだガラス材料の作製に取り組んだ。そして、炭酸ナトリウムと二酸化ケイ素の粉末を混ぜて加熱することにより、大量(数10%)のアルカリイオンを含むガラス材料の合成ができた。その材料からの光誘起脱離も観測できたが、やはり、高温にしないと十分な脱離量は得られなかった。

○コーティング材へのアルカリ原子の混ぜ込み

そこで、ガラス材料にアルカリ金属原子を含有させることにこだわらず、別の物質を検討することにした。候補として、ポリジメチルシロキサン (PDMS) を選択した。この材料は、アルカリ蒸気セルの内壁のコーティング材として利用されてきた物質で、その表面からの光誘起脱離も観測されている。しかもコーティングなしのガラス表面からの光誘起脱離に比べて脱離レートが大きいことが知られている。もしこのようなコーティング材を利用することができれば、セルの材質によらずに広く利用することができるため、むしろ好都合である。

まず、PDMS 表面にルビジウム原子を真空中で堆積した後、その場で直ちに光誘起脱離実験を行った。予想通り、はっきりとした脱離

信号が検出できた (図 3)。

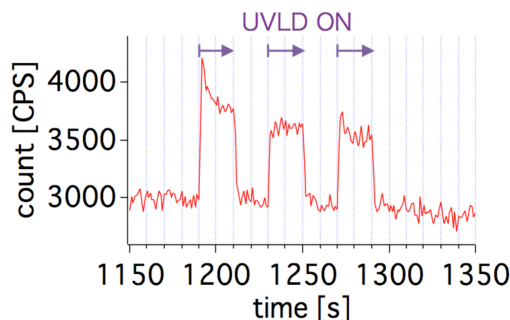


図 3 : PDMS からの光誘起脱離信号

引き続き、PDMS に事前にルビジウム原子を含有させる方法を何通りか試した。通常の光誘起脱離実験のように真空中で堆積させて混ぜ込む方法や、図 4 に示すように、真空中でルビジウム金属の固まりを PDMS に浸けて長時間放置する方法などを試みた。後者の方法は、最近の文献 (S.N. Atutov et al, arXiv:1511.07565 (2015)) において、PDMS 中へのルビジウムの拡散が報告されている方法であり、有望であった。しかし、いずれの方法も、PDMS にルビジウムが含有されたかどうか、XPS の検出感度では確認することができなかった。さらに、このように処理した PDMS を基板にコーティングして光誘起脱離実験を行ったが、ルビジウムの脱離を観測することができなかった。

まだ十分にさまざまな条件を検証し尽くしたとはいえませんが、現在までの結果から受ける印象としては、アルカリ金属原子の光誘起脱離を起こしやすい PDMS は、ある意味アルカリ金属原子との反応性が低く、逆にいうと、真空中で安定してアルカリ金属原子を取り込んでおかせることは難しいのかもしれない。

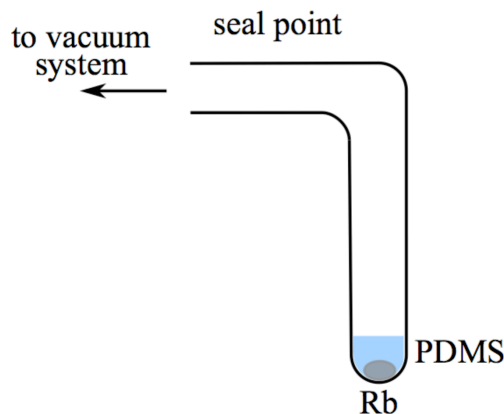


図 4 : PDMS に Rb 原子を分散させるため試みた方法の 1 つ

○結論

・アルカリ金属原子を含有したガラスの表面状態や、そこからの光誘起脱離の基本的特性について系統的に調べた。

・レーザー冷却実験に応用できる光誘起脱離レートを達成できるアルカリ金属含有ガラス材料は実現できなかった。

・ガラス材料にこだわらず、PDMS など容器の内側にコーティングする材料であれば、高い光誘起脱離レートを室温で実現できる可能性はあると考えるが、十分な検証までにはいたらず、今後の課題である。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

[1] Ryo Kumagai and Atsushi Hatakeyama, “Light-induced atom desorption from glass surfaces characterized by X-ray photoelectron spectroscopy”, Applied Physics B (掲載確定) 査読有

[学会発表] (計 3 件)

[1] 森山万里奈, 萩優太, 小川大翔, 熊谷瞭, 梶山温, 「ルビジウム含有材料を用いた光誘起脱離による原子供給源の開発」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市)

[2] 熊谷瞭, 梶山温, 「アルカリ原子の光誘起脱離とガラス表面結合状態の関係」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 18 日, 関西大学 (大阪府吹田市)

[3] 熊谷瞭, 池野智大, 梶山温, 「光誘起脱離研究のためのアルカリ原子吸着ガラス表面の評価」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 9 日, 中部大学 (愛知県春日井市)

[その他]

ホームページ等

<http://amo.lab.tuat.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶山 温 (HATAKEYAMA, Atsushi)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：70345073

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし