ピコ秒レーザによるガスイオン化特性と真空計測*

関根 重幸**・国分 清秀**・一村 信吾**・清水 肇**

(受付1992年12月1日, 掲載決定1993年2月6日)

Multiphoton Ionization of Gases and Pressure Measurement
by Pico-second LaserShigeyuki SEKINE, Kiyohide KOKUBUN,
Shingo ICHIMURA and Hazime SHIMIZU

(Electrotechnical Laboratory, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan)

(Received December 1, 1992, Accepted February 6, 1993)

1. はじめに

極高真空における圧力計測法の1つとして、レーザによって真空中の原子に非共鳴多光子イオン化を起こさせ、イオンの量から圧力を求める方法がある。この方法をより低圧に適用するにはイオン化を飽和させて感度を上げる必要がある。そのためには、高ピーク出力の短波長発振レーザを使用するのが有利である。我々はこれまで短波長という点で優れた市販のナノ秒エキシマレーザを用いて、各種希ガスなどのイオン化特性を調べ、この方法が圧力計測法として有用であることを実証したり、これまでの実験でクリプトン、キセノン、酸素分子および水素分子のイオン化の飽和を観測できた。しかし、エキシマレーザは日常の管理などの点で煩雑であり、実用化においては固体レーザ市販品の使用が望まれる。今回はエキシマレーザよりも長波長ではあるが2桁程高いピーク出力の市販ピコ秒YAGレーザの2倍波を用いて行った測定の結果について報告する。

この実験で、水素分子のイオン化が飽和することを確認、圧力計測への適用の可能性を検討した。この時、レーザパルス時間幅内における原子の運動が無視できるので、観測される信号は原子密度だけに依存する。

2. 実験方法

実験配置をFig. 1に示す。到達圧 10^{-7} Paの真空チェンバに四重極質量分析計(Q-mass)を設置し、透過イオンの質量数を2(水素分子)または、84(クリプトン原子)に固定した。チェンバへは、バリアブルリークバルブにより、試料ガス(水素またはクリプトン)を所用量導入し、圧力をB-Aゲージでモニタした。レーザは市販品(Continuum PY61C)で、発振段からのピコ秒

Fig. 1 Experimental setup.

* 平成4年10月30日第33回真空に関する連合講演会で講演(30Ap-3)

** 電子技術総合研究所(〒305 つくば市梅園1-1-4)

Table 1 Specifications of the lasers.

	ArF excimer laser Lambda Physik LPX300	YAG laser SHG Continuum PY61C
wavelength (energy)	193 nm (6.42 eV)	532 nm (2.33 eV)
pulse width	>10 ns	>10 ps
pulse energy	300 mJ	30 mJ
peak power density	>10 ¹¹ W/cm ²	>10 ¹³ W/cm ²

パルス出力光を一段増幅した後、第2高調波 (532 nm) に変換し、10 Hz で運転してイオン化用の光源とした。レーザの諸特性を Table 1 に示す。パルスあたりの最高出力は、第2高調波で30 mJ 程度であり、レンズで集光後のパワー密度は10¹³ W/cm² 以上と考えられる。Q-mass のフィラメントを点灯せずに、イオン化室にレーザ光をレンズで集光してイオンを生成させた。イオン引き込み電圧をレーザ光軸と垂直方向にかけて、イオンを質量分析管に通した後電子増倍管で検出した。信号はアナログ増幅してデジタルオシロスコープで100–200パルス積算し、ピーク面積を信号強度とした。

3. 測定結果

従来の研究で用いてきたパルス幅10数ナノ秒の ArF エキシマレーザを用いた場合には1光子あたりのエネルギーが6.42 eV あり、水素分子 (イオン化ポテンシャル 15.43 eV) を3光子で非共鳴イオン化できる。これに対し、YAG レーザ2倍波の光子エネルギーは2.33 eV なので、イオン化に7光子を要する。また、クリプトンについても、イオン化ポテンシャルが14.00 eV なので、同様に7光子でイオン化する。反面、レーザパルスのピークパワー密度がエキシマレーザよりも2桁高いので、光子数密度が10³¹ 光子/cm²s となっていて、ほとんどの多光子過程を飽和させられる。

一般に YAG レーザは、エキシマレーザに比べて、ショットごとの出力のふらつきやビームの断面の強度分布の不均一性が大きい。これらのイオン化に対する影響を調べるため、クリプトン原子および水素分子でイオン生成量のレーザ出力依存性を調べた。結果を Fig. 2, 3 に示す。どちらの場合も容易にイオンを観測できた。レーザ出力を上げていくと、クリプトン原子 (Fig. 2)、水素分子 (Fig. 3) で、イオン化の飽和を観測できた。レーザ出力が小さい領域では、共鳴効果や飽和効果が起こっていないければ、7光子過程であることから出力信号はレーザ光強度の7乗に比例するはずである*。Fig. 2, 3 の飽和前のプロットの傾きを見ると、どちらのガスでも

Fig. 2 Plot of signal intensity vs. laser power for krypton at 5×10^{-4} Pa.

Fig. 3 Plot of signal intensity vs. laser power for hydrogen at 2×10^{-4} Pa.

傾きが4ないし5となっている。特に、クリプトンについては、4, 5光子に相当するエネルギー領域に共鳴を起こす準位がないことは明らかなので、レーザビームの空間的不均一さに起因して傾きが小さくなったものと考えられる。つまり、レーザパルスのエネルギーが小さいときでも、レンズで集光したビームの中心軸上ではイオン化の飽和に近い光子密度が達成されている反面、周辺部ではレーザ強度のべき乗に比例するような確率でイオン

* 実験条件によっては光の電場のためのイオン化単位がシフトし、イオン化に必要な光子数が変わることもありえる。10 mJ で10 ps のレーザパルスを0.1 mmφに集光すると平均して $I = 10^{13}$ W/cm² 程度のパワー密度となる。この時の光電場は10⁸ V/cm で、励起準位やイオン化準位はほぼ ponderomotive エネルギー (∼0.3 eV) だけ高エネルギー側にシフトする。

Fig. 4 Plot of signal intensity vs. krypton pressure.
Pulse energy of the laser was 25 mJ.

Fig. 5 Plot of signal intensity vs. hydrogen pressure.
Pulse energy of the laser was 27 mJ.

化が起こっているためであろう。

また、レーザパルスエネルギーを Fig. 2, 3 の飽和エネルギー領域に対応する 25 mJ, 27 mJ にそれぞれ固定しガス圧を変化させた。Fig. 4, 5 に示すように、いずれのガスでも出力信号とガス圧には、低圧領域で良好な直線関係が得られた。従って、エキシマレーザのかわりにピコ秒 YAG レーザを用いても圧力計測ができることがわかった。圧力が高いところでの直接関係からのずれは、生成イオンの電荷反発および、検出系の飽和に起因すると考えられる。さらに、1 パルスあたりのエネルギーが小さいことから、真空チェンバに光を導入したときの脱ガス量がエキシマレーザを用いたときに比べてかなり少なくなる。このことは、極高真空圧力計測に当たって大きな優位点である。

ピコ秒レーザとエキシマレーザの相違点には、ピークパワーが高いこと、パルス時間幅が 3 桁短いことが挙げられる。すなわち、10 km/s 程度の速度で運動している原子でも、10 ps のパルス時間幅内には 0.1 μm しか移動しない。この値はレーザ光焦点径に比べて十分小さいので、パルス時間内の原子の運動が無視できて、より正確に密度測定ができることになる。エキシマレーザの

パルス時間幅内には、常温での平均速度 $\sim 2 \text{ km/s}$ を持つ水素分子は 20 μm 程度動いてしまうので、どの程度の速度を持った粒子が存在するのか予測できない条件での絶対圧測定をエキシマレーザを用いて行なうに当たっては注意が必要である²⁾。

使い勝手に関して、YAG レーザの 2 倍波は緑色の可視光であるのでアルミ蒸着ミラーを使用できて、チェンバの窓の材質もガラスで十分である。また、空気中に光を通してオゾン生成しない。さらに、レーザの運用コストが安いなどの利点がある。

4. ま と め

極高真空領域での圧力計測を意識して、ピコ秒 YAG レーザによるガスのイオン化特性を調べた。イオン化を飽和させるような出力においてレーザを使用すれば、使い勝手もよく、十分な精度での圧力計測が期待できる。

〔文 献〕

- 1) K. Kokubun, S. Ichimura, H. Hashizume, H. Shimizu, Y. Oowadano, Y. Matsumoto and K. Endo: J. Vac. Sci. Technol. A8, 1990 (3310).
- 2) 関根: 真空 36 (1993) 104.