

激光等离子体研究的真空室中背景 气体的激光多光子电离

崔俊文 吴存恺 林尊琪 林福成 舒海珍
潘成明 毕无忌 谢梓铭

(中国科学院上海光机所)

G. Mainfray

(法国萨克莱核研中心原子和表面物理实验室)

提要: 本文报道了在高功率密度激光辐照下, 激光等离子体研究用的真空室中背景气体(主要是真空系统中的油蒸气)的多光子电离的实验研究结果。得到的离子按其荷质比决定的飞行时间可以分成四组: H_2^+ , H^+ ; C^+ , CH^+ , CH_2^+ , CH_3^+ , N^+ , O^+ ; C_2^+ , C_2H^+ , $C_2H_2^+$, $C_2H_3^+$, $C_2H_4^+$, Si^+ , CHO^+ , O_2^+ 和 C_3^+ , C_3H^+ , $C_3H_2^+$, $C_3H_3^+$ 等。此外, 还观测到 C^{++} 离子。最后充入一定浓度的氩气, 观测到了氩离子。

Laser multiphoton ionization of background gases in the vacuum chamber for laser produced plasma study

*Cui Junwen, Wu Cunkai, Lin Zhunqi, Lin Fucheng, Shu Haizen
Pan Chengming, Bi Wuji, Xie Zhiming*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

G. Mainfray

(Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, Service de Physique des Atomes et de Surface,
F91191 Gif-Sur-yvette Cedex, France)

Abstract: In this paper the experimental results of laser multiphoton ionization of background gases (mostly oil-vapor) in the vacuum chamber for laser produced plasma study are presented by using high power laser irradiation. According to the time-of-flight-spectrum of the ions with different specific charge, the obtained ions can be divided into four groups: H^+ , H_2^+ ; C^+ , CH^+ , CH_2^+ , CH_3^+ , N^+ , O^+ ; C_2^+ , C_2H^+ , $C_2H_2^+$, $C_2H_3^+$, $C_2H_4^+$, Si^+ , CHO^+ , O_2^+ and C_3^+ , C_3H^+ , $C_3H_2^+$, $C_3H_3^+$. Moreover, C^{++} ions have also been observed. Finally by adding argon gas with definite concentration into the vacuum chamber, Ar^+ is observed.

一、引言

关于利用多光子电离方法得到原子、分子、离子已有许多文献报道,有从原子系统得到^[1~3],有从分子束系统得到^[4~6],理论和实验研究都取得了很大的进展。最近,我们从实验上研究了用于研究激光等离子体的真空室中背景气体对激光多光子电离的影响,结果观测到大量的原子和原子团离子,其中主要是真空室中油蒸气的分解物(分子碎片),特别是观测到 C^{++} 离子。在这样的背景气体条件下,充入气压高一个数量级的氩气,观测到了氩的一次离化离子。

二、实验方法

本实验所用的激光系统是六路激光系统中的一路,其输出脉冲宽度为200微微秒,输出能量在焦耳级,用 $f/3$ 消象差非球面聚焦后,其激光光斑直径为60微米,聚焦后功率密度可达 $10^{13} \sim 10^{15}$ 瓦/厘米²^[7]。

实验装置如图1所示。真空靶室的最高真空度为 2.3×10^{-5} 托。激光束经入射窗口进入真空室后,由焦距为120毫米的非球面透镜聚焦,焦点处即为离化区。在离化区纵向(垂直于激光束)加电场强度为600伏/厘米的电场,被离化的离子经电场加速后,飞行24厘米到达电子倍增器(56P17),由示波器观察离化离子的强度,即离化离子数目。由

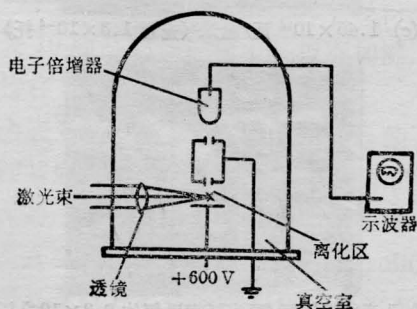


图1 实验装置示意图

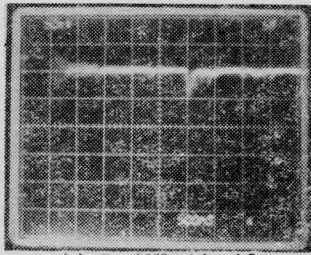
于不同荷质比的离子在电场中得到的加速度不同,因此可以从离子飞行时间确定属何种元素(原子,分子)的离子,示波图上的垂直幅度代表离子数目。真空室的设计是用来进行激光等离子体研究的,体积约2米³,由机械泵和油扩散泵(没有冷阱)维持 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 托的真空度。

三、实验结果及分析

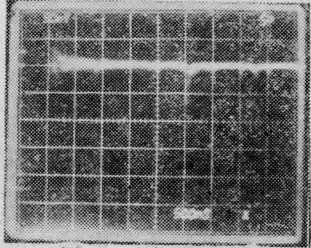
图2给出了在真空室背景气体气压为 2.3×10^{-5} 托时,随着激光强度增加离子讯号的变化情况。带电粒子在电场中的加速度与粒子的质量和电荷有关。在我们的实验条件下,正离子被加速到负电极的小孔处($\phi 2$),然后在等电位室内匀速到达电子倍增器的接收面。不同荷质比的离子的飞行时间为 $t = K\sqrt{A/z}$,其中 A 为质量数, z 为电荷数, K 是与加速电场强度和飞行距离有关的常数。

随着激光强度的增加,先后检测到各种离子。图2(a)的激光强度为 7×10^{12} 瓦/厘米²,按飞行时间分析结果只有 H^+ (0.7微秒), C^+ (2.5微秒)和 C_2^+ (3.7微秒)。激光功率增加,出现了许多新的离子讯号, H^+ 、 C^+ 、 C_2^+ 等的讯号也大大地增强。图2(e)在2.5~3微秒处有连续的讯号,它是由荷质比差不多的离子形成的。

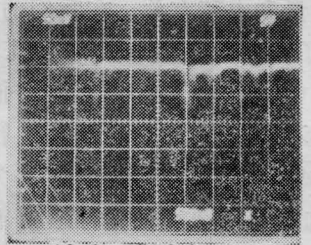
根据图2分析,我们可以把所得到的离子讯号分成四组即:① H^+ , H_2^+ ,与飞行时间0.9~1.1微秒相对应;② C^+ , CH^+ , CH_2^+ , CH_3^+ , N^+ , O^+ ,与飞行时间为2.4~3微秒相对应;③ C_2^+ , C_2H^+ , $C_2H_2^+$, $C_2H_3^+$, $C_2H_4^+$, Si^+ , CHO^+ , O_2^+ ,与飞行时间为3.2~4微秒相对应;④ C_3^+ , C_3H^+ , $C_3H_2^+$, $C_3H_3^+$,与飞行时间大于4微秒相对应。对应于1.7微秒的讯号是 C^{++} 离子。当然,在②组中的讯号也有可能是第④组中的粒子的二阶电荷的离子,这有待于进一步分析。



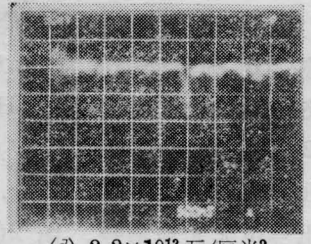
(a) 7×10^{12} 瓦/厘米²



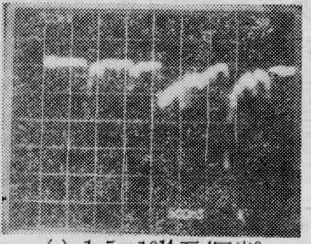
(b) 1×10^{13} 瓦/厘米²



(c) 1.7×10^{13} 瓦/厘米²



(d) 2.2×10^{13} 瓦/厘米²



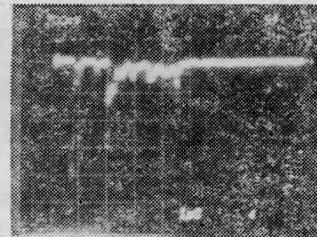
(e) 1.5×10^{14} 瓦/厘米²

图2 离子讯号随激光强度的变化

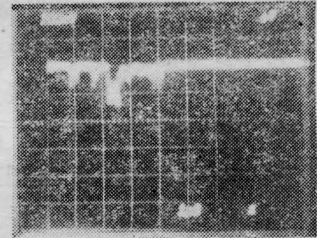
图3给出了在真空室背景气体气压为 2.3×10^{-5} 托时充入氙气, 控制氙气流量使真空室的气压维持在 1.3×10^{-4} 托情况下所得到氙的多光子电离讯号。在激光功率基本相同的条件下, 我们比较了充氙气[图3(a)、

(c)]和不充氙气的背景气体[图3(b)、(d)]的离化讯号, 得到对应于氙的一次离化离子的飞行时间是4.5微秒, 与我们的实验条件相符。在实验中, 我们观测到当激光强度从 10^{13} 瓦/厘米² 增加到 10^{14} 瓦/厘米² 时, 氢的离化讯号变化不大。

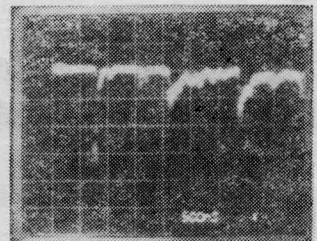
以上 H^+ , C^+ , C^{++} , Si^+ , $C_nH_n^+$, O^+ 等离子, 主要是来自真空室中背景气体中的多原子分子, 其中主要是扩散泵中的硅油蒸气和密封用的油脂的蒸气。它们在强激光作用下, 通过激发、离解、离化, 最后成为原子离子



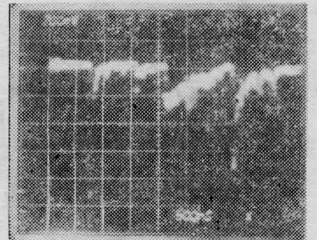
(a) 1.3×10^{14} 瓦/厘米²(充氙 1.3×10^{-4} 托)



(b) 1.4×10^{14} 瓦/厘米²(背景气体 2.3×10^{-5} 托)



(c) 1.45×10^{14} 瓦/厘米²(充氙 1.3×10^{-4} 托)



(d) 1.5×10^{14} 瓦/厘米²(背景气体 2.3×10^{-5} 托)

图3 真空室内充或不充氙气的离化讯号比较

和小的原子团离子($C_nH_n^+$, CHO^+ 等)。据文献[9]报道,在经激光作用下,多原子大分子可以有三种机理达到多光子电离,其一是在激光作用下,整个大分子被激发到高于离化电位,离解成原子或原子团,再进一步吸收激光,形成离子;其二是在激光作用下先形成整个大分子离子,然后再在激光作用下离解成原子或原子团离子;其三是大分子被激发,但未达到离化限就离解成原子和小的原子团,最后在激光进一步作用下形成离子。这些机理都是针对比较低的激光功率(一般在 $10^8 \sim 10^{10}$ 瓦/厘米²)情况下提出来的,他们的实验结果可以得到质量数很大的离子,例如 $C_6H_6^+$ 等。我们的实验结果与他们的实验结果相比较:分子成分较复杂,激光功率密度高出4~6个数量级。从图3(b)可以看出,在未充氩气时,在我们系统中没有飞行时间超过4.2微秒的离子,即得到的离子质量数都在40以下。即使激光功率小到 10^{12} 瓦/厘米²时结果也是如此。由此可以认为:在很高的激光功率密度($>10^{12}$ 瓦/厘米²)作用下,多原子分子的多光子电离过程很可能是分子吸收强激光之后,先离解成原子或小的原子团,这些原子或原子团再吸收多个光子被电离形成离子。除了激光功率密度高这个条件外,还应当和激光脉冲时间有关。

从我们得到的离子讯号, H^+ , O^+ , O^{++} , $C_nH_n^+$ 及 O^+ 和 Si^+ 等来看,这些原子或原子团的电离电位相差不是太大,例如 H (13.598 电子伏), C (11.26 电子伏), CH (11.13 电子伏), CH_2 (11.9 电子伏), CH_4 (13.12 电子伏), O (13.618 电子伏), C_2H_5 (8.72 电子伏), Si (8.15 电子伏)等,由于这个原因,当这些原子或原子团形成之后,他们的多光子电离所需要的激光功率大体上是差不多的,而它们的质量数又有些差别,因而激光功率提高之后,这些原子或原子团同时离化,而飞行时间又相差不多(由质量数差别所致),这就导致离子讯号在示波器上分段地连成一片。

六路实验室的全体同志参加了本实验工作,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] P. Agostini *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **42**, 1127.
- [2] P. Kruit *et al.*; *J. Phys.*, 1981, **B14**, L597.
- [3] L. Huillier *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**, 1814.
- [4] U. Boesl *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1980, **72**, 4327.
- [5] J. P. Reilly *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1981, **73**, 5468.
- [6] Летохов В. С. *и др.*; *ЖЭТФ*, 1980, **78**, 222.
- [7] 邓锡铭等;《光学学报》, 1981, **1**, 289.
- [8] S. Rockwad *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **28**, 175.
- [9] V. S. Antonov *et al.*; *Appl. Phys.*, 1981, **24**, 89.