

1003-7713/2000/03-0263-07

脉冲光电子枪中光电子束性能研究

花晓清 张林虎 白吉玲* 郭文生**

(中国科学院大连化学物理研究所分子反应动力学国家重点实验室 大连 116023)

摘要: 利用新设计的脉冲光电子枪,研究了光电子束的能量分布,光电子数密度与激光强度的关系和光电子在电离区内的滞留时间。大部分电子的能量为光发射电子的剩余能量,但是由于电子的空间电荷效应,电子能量分布具有加宽现象。每个激光脉冲发射到电离区内的光电子数密度在 $10^9/\text{cm}^3$ 以上。

关键词: 光电子发射; 光电子数密度; 空间电荷效应

中图分类号: O462.3, O462.3, O441.1 **文献标识码:** A

1 引言

将一束光照射到金属表面,当入射光子能量 ϵ_0 大于金属脱出功 ω 时,将有光电子从金属表面逸出,弛豫时间不超过 1 ns,这就是我们熟知的光电效应。逸出光电子的动能为 $mv^2/2 = \epsilon_0 - \omega$,对于短波长的光子,一个光子就可以打出一个电子,而对于可见光这样较长波长的光子,一个光子的能量不足以克服金属的脱出功,只有同时吸收多个光子才能使电子逸出表面,这就是所谓多光子过程。激光的应用,使多光子电子发射成为可能,多光子过程只有在强光场中才能发生。

通过改变激光的波长和强度,可以很容易地控制光电子的能量和数量,利用超短脉冲激光器还可以获得高强度短脉冲的光电子束。Toyoka 利用脉宽为 20 ns 的准分子激光器,产生出了相同脉宽的脉冲电子束^[1]。Schmittenmaer 等人曾在实验中获得了飞秒量级脉宽的光电子束^[2]。

超短脉冲光电子束的出现,作为一种新的电离手段,很快就被引入到飞行时间质谱上。Cheng、Boyle 和 Schriemer 等人将激光直接照射到 TOF 质谱的拉出极或排斥极上^[3-5],得到了质量分辨较好的 TOF-MS 谱,但是电子的加速与离子的加速电场是在同一区域内,无法分开。王利等人利用脉冲电场延迟技术^[6],把光电子的产生、加速及碰撞电离过程从 TOF-MS 的加速电场中分离出来,制造了一个独立的脉冲光电子束源,可以方便地调节光电子能量和数量以及脉宽。激光的共振多光子电离(REMPI)具有较高的选择性和较好的质量分辨,但是共振电离技术对波长强烈的依赖性限制了它的应用,尤其在研究未知物种方面。与激光电离技术的高选择性相比,电子碰撞电离技术(Electron Impact Ionization)的显著特点是通用性很好^[7],特别是在分析未知物种时。使用常规的脉冲电子碰撞电离技术,由于其电子数密度小,在 TOF-MS 上使用影响它的灵敏度和质量分辨率^[8]。热阴极材料工作温度高,发射稳定性差,易

* 通讯联系人, Email: jlbai@ms.dicp.ac.cn

** 辽宁大学化学科学与工程学院。

中毒,易氧化,这很大程度上限制了这种电子束的应用。激光诱导金属产生的脉冲光电子束具有数密度大,能量方便可调,对真空度要求不高,稳定性高等优点。本文阐述了两种光子枪所产生的光电子束的一些性能,了解这些性能为进行光电子碰撞电离机理的研究提供了实验基础。

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

本电子枪是在自制的飞行时间质谱仪^[9]上设计的。飞行时间质谱仪由束源室和电离室组成,分别由一台油扩散泵和一台前级机械泵抽真空。实验过程中束源室的动态真空度可维持在 1 mPa, 电离室为 0.1 mPa。

在 TOF 质谱中,电离-加速区是由排斥极(A)、拉出极(B)和加速极(C)组成(如图1)。排斥极与拉出极之间的区域为电离区,拉出极与加速极之间的区域为加速区,脉冲(PF)电场加在排斥极和加速极上,拉出极上的电压通过分压电阻 R_1 和 R_2 获得,调节 R_1 、 R_2 的比值可以获得质量分辨很好的质谱。根据实验的需要有时在电离区内预置一个小直流(dc)电场。

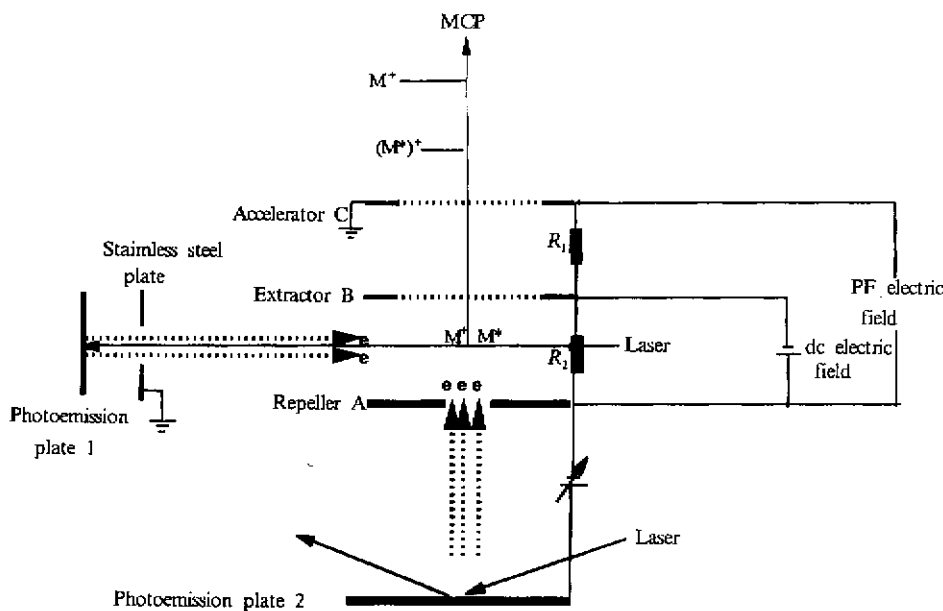


图1 光电子发射及脉冲区域示意图

Fig. 1 Schematic of pulsed field and photoemission electron electrodes

对于电离源部分,由王利等人对原设计的飞行时间质谱电离源作了较大改进^[10],用一个激光诱导的超短脉冲的电子束代替直接用激光作为电离源。图1给出了光电子枪结构示意图。两个光电子枪分别为光极1(Photoemission plate 1)和光极2(Photoemission plate 2),它们都是不锈钢光电子发射靶。在实验中对光极1结构进行了进一步的改造,用一个中间带洞的不锈钢板代替铜网,中间的洞的直径是6 mm左右,这样可以避免在激光穿过铜网时在网上打出电子参加反应,进一步简化实验条件。为了避免激光穿过电离区时可能激发气体,我们还对离子加速电

场和光电子发射极进行了进一步的改造。如图1中光极2部分,排斥极中间带一个直径5~7mm的洞。发射光电子的不锈钢靶(光极2)安装在排斥极的正下方与其他电极对称放置。排斥极与光极之间的距离是20mm,激光从侧面照射到正对着洞的不锈钢靶上,电子从排斥极的洞中发射到电离区里面。两个光电子枪距离电离区的距离有些不同,光极1距离电离区中心为65mm,光极2距离电离区中心为25mm。

实验中使用的激光器有XeCl准分子激光器(德国Lambda Physik公司EMG-50,10ns脉宽,308nm),及Nd:YAG激光器(美国Spectra Physics公司,DCR-2,8ns脉宽)三倍频355nm的输出,经 $f=830\text{mm}$ 石英聚焦镜聚焦后垂直照射不锈钢靶(光极1)或斜着照射到不锈钢靶(光极2)上,根据不同情况可采用不同的光极。

实验中使用的气体为工业高纯级,未经进一步纯化。

2.2 光电子能量分布

对光电子的测量不是直接测量光电子信号,而是直接测量电子激发的离子信号,然后反推出有关光电子的信息。我们测量了实验中用到的两种光电子枪的光电子能量分布,而且测量了不同波长的激光诱导的光电子的能量分布。

2.2.1 利用三电极系统测量光电子能量分布 如图2是测量光电子能量分布的三电极系统,光极1与不锈钢板1之间距离为10mm,它们之间加正电压(V_e)把电子加速,不锈钢板1与不锈钢板2之间的距离也为10mm,它们之间加反向电压(V_f),使电子受到阻力,以氩(Ar)为例测量了在不同加速电压(V_e)下光电子的能量分布。实验中脉冲电场高度为700V,延迟时间为0.05 μs ,采用YAG激光的355nm输出,激光垂直照射到光极1上,照射到靶上的激

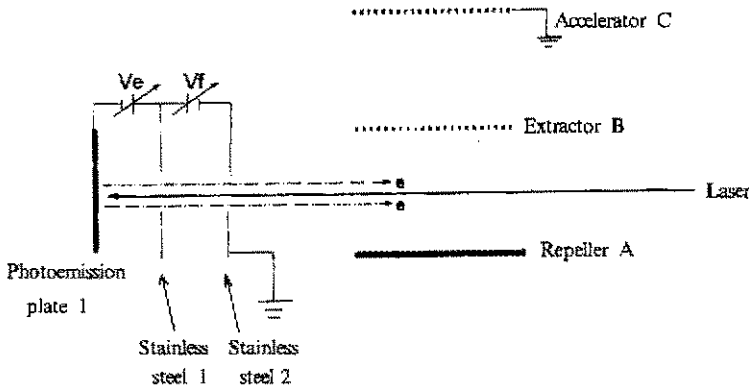


图2 测量光电子能量分布的三电极系统

Fig. 2 Schematic drawing of three electrodes

光强度大约为1.5mJ,光斑直径大约为2mm。图3是在不同 V_e 条件下电子能量分布。在355nm激光作用下不锈钢发射电子是双光子过程,电子的剩余能量大约为2eV。从图中可以看出,电子分布最多的是在2eV左右,例如当电子束加速电压(V_e)分别为2、6、8、12、18V等时,电子分布最多的位置分别为4、6、10、16、20eV等,大致等于加速电压加上光电子剩余能量(2eV),但是电子能量存在加宽现象,存在一部分低能(小于2eV)和高能电子。

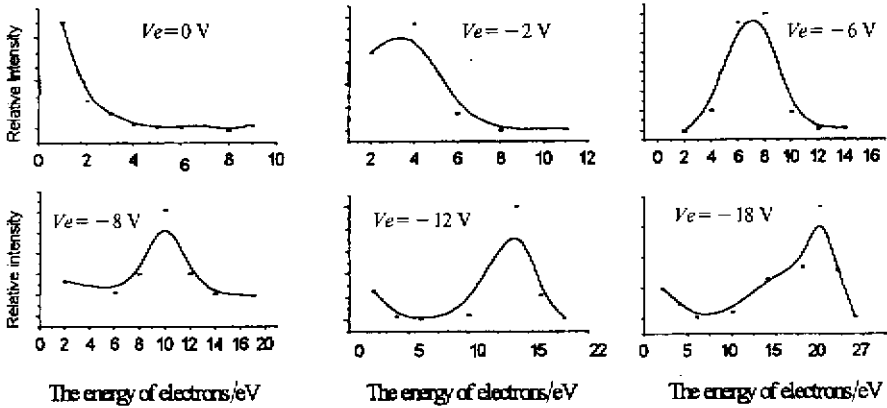


图 3 不同加速电压条件下电子能量分布

Fig. 3 The energy distribution of electrons at different accelerating voltage

2. 2. 2 308 nm 激光与光极 2 作用产生的光电子能量分布 利用光极 2 作为光电子发射靶(如图 1),用准分子激光器输出的 308 nm 激光从侧面斜着入射到不锈钢靶上,在光极 2 和排斥极之间加一个反向电压($U_{laser} - U_{repole}$),考察了 Ar^+ 信号强度与反向电压的关系,从而推测出光电子的能量分布,图 4 是不同激光强度条件下电子能量分布,所用脉冲电场为 800 V,延迟时间为 0.2 μs 。采用 308 nm 激光诱导不锈钢发射电子是双光子过程,电子剩余能量大约为 3 eV,从图 4 可以看出电子分布最多的位置大约为 3 eV,与光电子的剩余能量大约是一致的,但是电子的能量也出现明显加宽现象,存在一部分低能(小于 3 eV)和高能(大于 15 eV)的电子,这部分低能和高能电子的存在对里德堡态的形成起重要作用。

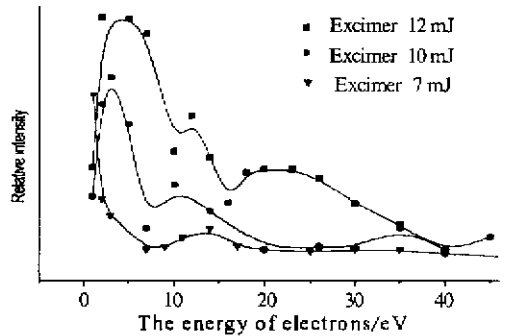


图 4 不同激光强度条件下的电子能量分布

Fig. 4 The energy distribution of electrons vs the intensity of laser

2. 2. 3 355 nm 激光与光极 2 作用产生光电子的能量分布 采用与 2. 2. 2 部分同样的方

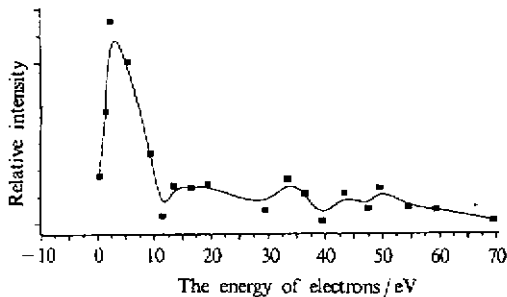


图 5 355 nm 激光诱导的电子能量分布

Fig. 5 The energy distribution of 355 nm laser induced electrons

法,只是用 Nd-YAG 输出的 355 nm 激光代替 308 nm 激光,同样测量了 Ar^+ 信号强度与反向电压的关系,推测出电子能量分布。图 5 是电子能量分布的相对强度,电子分布最多的位置大约在 2.8 eV,与剩余能量 2 eV 有一些偏差,但是它具有同样的趋势,能量明显加宽,也存在一部分低能和高能电子。

我们对两种光电子枪不同激光诱导的光电子能量分布进行了测量,发现光电子能量都有加宽现象,大部分电子的能量在光发射电子的剩余能量附近,但是出现了一部分低能(小于

2eV)和高能(大于 15eV)电子,造成电子这种能量分布加宽是由于电子之间的空间电荷效应,电子之间的相互作用力使电子能量分布加宽。光阴极发射电子时极间电压需要几千伏^[11, 12],才能把电子完全拉走,当极间电压较低时,电子就会在阴极表面堆积,产生空间电荷效应^[11],在激光强度小于 10MW/cm² 时,主要是空间电荷效应影响电子能量分布^[13, 14],在实验中激光强度不超过 10MW/cm²,电子束加速电压(V_e)很小,有时电子束根本没有被加速,所以在我们的实验条件下一定存在空间电荷效应,在激光强度比较高时,空间电荷效应会增加,在不锈钢靶表面能堆积部分电子,电子之间的排斥力使电子能量分布加宽,出现一部分低能和高能电子,此外采用加反向电压排斥低能电子的方法,也能造成电场分布的改变,给实验带来误差,精确的方法应该直接测量光电子的能量。

2.3 光电子数密度的测量

图 6 是测量每个脉冲激光所诱导光电子的数密度的装置,光极 2 与排斥极之间的距离为 20 mm,排斥极与不锈钢板之间的距离为 10 mm,光极 2 作为光电子发射靶,采用 Nd-YAG 激光器的 355 nm 输出,激光从侧面照射到光极 2 上,排斥极中央有一个直径为 6 mm 的洞,电子从洞中发射上来,由上面的不锈钢板接受,接受到的电子会在电阻两端产生一个脉冲电压信号,实验中电池电压为 2.8 V,电阻为 1.86 kΩ。测量每个脉冲激光诱导的发射到电离区内电子数密度。用数字化示波器(Lecroy 9350 cm/500 MHz)测量电阻 R 两端的电压信号,对产生的脉冲电压积分可以求得不锈钢板接受到的光电子数量。每个激光脉冲不锈钢板接受到的光电子的电量为 Q

$$Q = \int I dt = \int \frac{V}{R} dt = \frac{1}{R} \int V dt = \frac{S}{R} \quad (1)$$

式中, S 为每个脉冲在电阻 R 两端产生的电压信号的积分, Q 所对应的每个激光脉冲不锈钢板接受到电子数为 N_e 。

$$N_e = Q / 1.6 \times 10^{-19} = S / 1.6 \times 10^{-19} \times R \quad (2)$$

电子与气体的作用区域假设是圆柱形,直径是

6 mm,(见图 1)光极 1 和光极 2 发射光电子的直径都是 6 mm,假设圆柱体的长度为 10 mm,

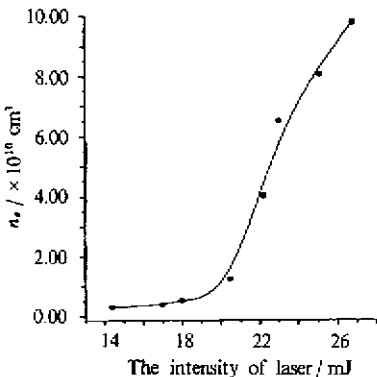


图 7 光电子数密度与激光强度的关系

Fig. 7 The electron density vs the intensity of laser

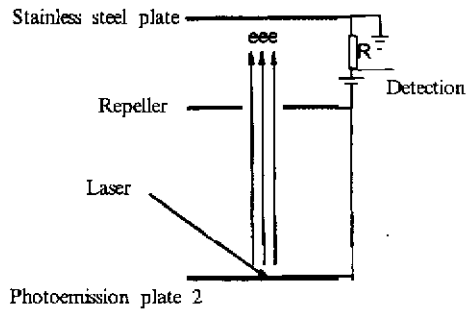


图 6 测量诱导光电子的数密度示意图

Fig. 6 Schematic of the collector setup of electrons

与排斥极和拉出极之间的距离相当,所以电子与气体作用区体积 V 为 0.283 cm³,因此电离区内单位体积的光电子数密度 n_e ,

$$n_e = N_e / V = S / (1.6 \times 10^{-19} \times R \times V) \quad (3)$$

图 7 是光电子数密度与激光强度的关系,发现当激光强度在 14 ~ 26 mJ 时,每个脉冲发射到电离区内的光电子数约为 $3 \times 10^9 \sim 10^{10} / \text{cm}^3$ 。

2.4 电子在电离区内的滞留时间

将脉冲电场换成负高压,排斥极接负极,加速极接正极,加速极总是接地, MCP 采用正高压。这样可以测量电子。逐渐改变脉冲电场的

延迟时间,看一看激光诱导的一个脉冲的电子束在电离区内的滞留时间,图8是光电子信号强度与脉冲电场延迟时间的关系。电子的质量很小,它的飞行时间极短,电子信号与脉冲电场的噪音信号在飞行时间质谱上出现在同一个位置,但是还可以分辨出电子信号和脉冲电场噪音信号,从图中可以发现当脉冲电场延迟 $0.1 \mu\text{s}$ 时电子信号已经变得很小,即光电子在电离区内的滞留时间短于 $0.1 \mu\text{s}$ 。

3 结果与讨论

我们研究了激光诱导光电子束的一些性能,电子能量分布明显有加宽现象,大部分电子的能量为电子发射时的剩余能量,由于空间电荷效应,出现了一部分低能和高能电子,高能电子足以把气体电离。每个脉冲发射到电离区内的电子数密度大约为 $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,电子在电离区内的滞留时间大约为 $0.1 \mu\text{s}$ 。了解电子束这些性能为研究里德堡态的形成机理有重要作用。

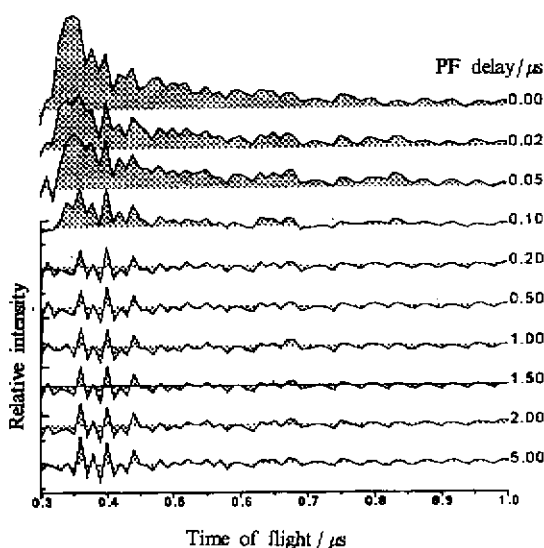


图8 光电子信号强度与脉冲电场延迟时间的关系

Fig. 8 The residence time of electrons stay in ionization region

参 考 文 献

- [1] Kawamura Y, Toyoda K, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**: 307
- [2] Aeschlimann K, Schmuttenmaer K, et al. *J. Chem. Phys.*, 1995, **102**: 8606
- [3] Chem K, Dai K. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, **64**: 2211
- [4] Boyle K, Pfefferle K, et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**: 323
- [5] Schriemer K, Liang Li. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**: 55
- [6] Wang Li (王利), Li Haiyang (李海洋), Bai Jiling (白吉玲), Lu Richang (吕日昌). *Science in China B (中国科学 B)*, 1998, **41**: 525
- [7] Wang A P, Guo X J, Li L. *Anal. Chem.*, 1995, **66**: 3664
- [8] Jack A Syage. *Phys. Rev. A*, 1992, **46**: 5666
- [9] Dai Dongxu (戴东旭), Bai Jiling (白吉玲), et al. *Progress of Nature Science (自然科学进展)*, 1995, **5**: 129
- [10] Li Wang, Hai yang Li, Jiling Bai, et al. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc.*, 1998, **181**: 53
- [11] Liu Yanwen (刘燕文), Zhang Gengmin (张耿民), Liu Weimin (刘惟敏). *Beijing Daxue Xuebao (北京大学学报)*, 1996, **32**: 96
- [12] Lee C H, Oettinger P E. *Rev. Sci. Instr.*, 1985, **56**: 560
- [13] Gy Farkas, Cs Toth. *Phys. Rev. A*, 1990, **41**: 4123
- [14] Guillaume Petite, Pierre Agostini, et al. *Phys. Rev. B*, 1992, **45**: 12210

Study on the Properties of Photoemission Electron Beam Produced by a Pulsed Photoemission Electron Gun

Hua Xiaoqing Zhang Linhu Bai Jiling* Guo Wensheng

*(State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics, Dalian Institute
of Chemical Physics, Chinese Academy of Science, Dalian 116023)*

Abstract By using the new designed pulse photoemission gun, the energy distribution of photoemission electron beam, the relationship between the number of photoemission electrons and the intensity of laser and the duration of photoemission electrons in ionization region were studied. Most of electrons have the excess energy which laser induce photoemission electrons leave, but the energy distribution of electrons is widened by the space charge effect of electrons. For on pulse, photoemission electron density with about $10^9 \sim 10^{10}/\text{cm}^3$ in the ionization region was found.

Key words Photoemission electrons, Density of electrons, Space charge effect

* To whom correspondence should be addressed.