

用脉冲电场光电流光谱研究 Ne 原子的自电离态

张连芳 赵文正 尚仁成 潘 力 王世亮 文克玲 陈懿延

清华大学现代应用物理系, 北京, 100084

1990 年 2 月 28 日收到

本文用脉冲电场光电流光谱的实验方法测定 Ne 原子 $ns'(n=15-31)$ 和 $nd'(n=13-30)$ 两通道的 35 条自电离态能级, 用参数拟合得出 Ne 原子 ns' 和 nd' 通道的电离阈值, 计算了每条能级的量子亏损. 实验用脉冲电场代替直流放电, 基本上消除了 Stark 效应在光电流光谱测量中的影响.

PACC: 3220J; 3280D

一、引 言

Ne 原子是光谱学广泛研究的对象, 研究 Ne 可以得到 $l-s$, $j-j$ 耦合的各种信息. 有关激光机理的研究使 Ne 成为少数几种研究得最深入的元素之一, 但这些研究多数集中在较低的能级上. Ne 的电离阈值高达 21.5eV, 由于缺乏合适的激发方式, 对高激发态上 Ne 的能级结构了解并不多. Codling^[1] 最先利用同步辐射光源来研究 Ne 原子, 他用 575 Å 左右的短波光源测量了 Ne 的电离阈值和一些自电离态能级, 以后 Radler^[2] 对此方法作了许多改进. 不过这种同步辐射光源很难获得好的光谱分辨率.

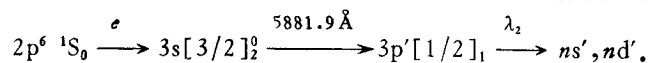
光电流光谱是一种研究原子高激发态的重要方法. 空阴极放电和激光双共振激发的结合提供了一种有效的方法, 能够将 Ne 激发到 Rydberg 和自电离态^[3]. 不过由于放电管两端存在直流电场, 原子高激发态的 Stark 效应变得明显, 影响了这种方法的使用. 我们在直流放电光电流光谱的基础上, 发展了一种毫微秒脉冲电源, 使原子在共振激发时, 处于无电场的空间中, 用这种方法进行了 Ne 原子高 Rydberg 能级有关性质的实验研究, 得到一批 Moore 的原子能级所没有的自电离态的能级数据.

二、实验方法与实验装置

1. 激发方式

Ne 的基态为 $2p^6$, 激发一个电子后的离化基态为 $2p^5$, 离化的基态经过 $l-s$ 耦合得到核心角动量 $j_c = 1/2, 3/2$ 两个值, 使 Ne 原子的光谱分为 $2p^5(^2P_{1/2})$ 和 $2p^5(^2P_{3/2})$ 两个系列, 这两个系列的电离限不同. 我们研究的为 $2p^5(^2P_{1/2})$ 系列中, 能量超过 $2p^5(^2P_{3/2})$ 的

电离限的高 Rydberg 态, 即自电离态。为书写方便, 下面用带“'”号的组态表示核心为 $2p^5(^2P_{3/2}^o)$, 不带“'”号的组态表示核心为 $2p^5(^2P_{3/2}^o)$, 见图 1。激发通道为



这里引用的为 Racah 符号。第一步激发采用电子碰撞来实现, 克服了通常光学激发能量不够的困难, 在此基础上, 第一束激光波长为 $5881.9\ \text{\AA}$, 将 Ne 共振激发到中间态 $3p'[1/2]_1$, 第二束激光 λ_2 , 波长在 $4340\text{--}4240\ \text{\AA}$ 范围内扫描, 将 Ne 激发到 ns' 和 nd' 通道的高 Rydberg 态 ($n \leq 31$)。

电子碰撞激发一般依靠直流辉光放电来实现, 为了减小放电管两端直流电场对原子能级的 Stark 效应, 在我们的实验中, 放电管两端加上受时钟控制的脉冲电源, 结果是激光脉冲到来之前的一段时间内, 放电管两端的电压接近于零, 因此原子是处于无电场状态中, 由两束激光共振激发至 Rydberg 态的, 这样在高 Rydberg 能级测量中, 大大减小了 Stark 效应的影响。电源脉冲、激光、输出信号的相对时间关系见图 2, 它们都受时钟的控制。

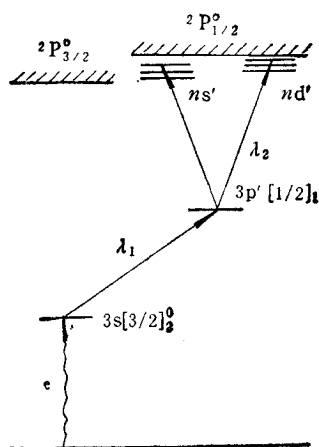


图 1 Ne 原子的电子碰撞和激光双共振激发方式示意图

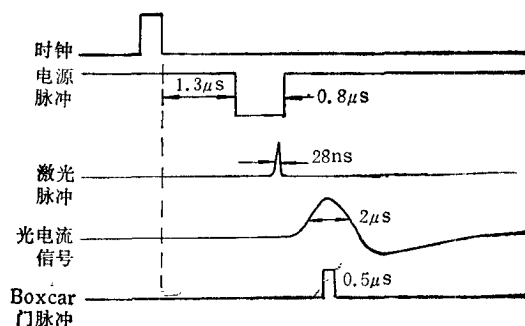


图 2 时钟、电源、激光与输出信号之间的时间关系

实验中 Ne 原子由电子碰撞和激光双共振的联级激发到达 Rydberg 态, 使用脉冲电源后, 激光必须在第一激发态退激前到达, 才能实现联级激发。实验中选择的第一激发态 $3s[3/2]_2^o$ 为亚稳态, 寿命很长 (24.4s), 激光脉冲落入电源负脉冲之内, 就能实现联级激发。实验时激光是靠近电源负脉冲的后沿处引入的, 见图 2, 这样可减小一些短寿命能级退激时产生的干扰, 提高输出信号的信噪比。如果第一激发态不是亚稳态, 必须仔细考虑激光脉冲的相对延时对激发的影响。

2. 实验装置

实验装置主要由四个部分组成: 电源及 Ne 放电管, 激光系统, 信号显示和记录系统, 时控电路。实验装置见图 3。

1) 电源与 Ne 放电管 电源是我们自制的系统,它由直流电源和负高压脉冲电源组合而成。直流电源输出电压为 0—300V, 电流为 1—10mA, 电压稳定度为 0.1%。脉冲电源受时钟控制, 工作频率为 10—100Hz, 脉冲输出电压为 0—(-300)V, 连续可调。负脉冲宽度为 200—1500ns, 连续可调, 上升、下降沿为 50—100ns。

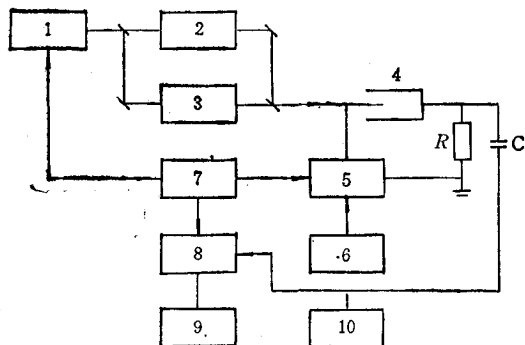


图3 实验装置示意图

1 为准分子激光器; 2, 3 为染料激光器; 4 为 Ne 放电管; 5 为负脉冲电源; 6 为直流电源; 7 为 时控电路; 8 为 Boxcar; 9 为记录仪; 10 为示 波器

Ne 放电管为空心阴极放电结构, 充气气压为 1—3Torr, 阴极用 Ni 片制成, 在实验室用激光波长范围内, 不会产生光电效应的干扰。

2) 激光系统 激光系统由德意志联邦共和国 Lambda Physik 公司制造的 EMG 202 MSC 准分子激光器泵浦两台 FL 3002 染料激光器组成。系统重复频率为 1—150Hz, 染料激光器输出波长范围为 2170—8600 Å, 激光输出能量为 0—10mJ。染料激光线宽小于 0.2cm^{-1} , 波长重复性优于激光线宽。激光波长由计算机显示, 经过标定后激光波长刻度的精度与激光线宽相当, 约为 0.2cm^{-1} 。

3) 信号显示与记录系统 激光共振激发原子到高激发态, 将引起放电回路中电流变化, 在负载电阻上产生光电流信号。用 Boxcar 信号平均器 (EG & G Princeton 162 型) 和记录仪记录光电流信号, 扫描第二束激光即可获得光电流光谱图。实验中用示波器监测光电流信号的波型。

4) 时控电路 时控电路包括时钟发生器和几个独立的延时器, 系统的工作频率由时钟控制。电路输出宽度为 20—1500 ns 连续可调的脉冲, 用于触发激光器、脉冲电源、Boxcar, 时钟脉冲和它们之间的延时关系分别独立可调, 用于控制整个工作系统的运行和时间同步。

三、实验结果与分析

1. Ne 原子 $2p^5(^2P_{1/2}^o)$ 系列的自电离态能级

图4为激光波长扫描时记下的光电流光谱的一部分。根据共振波长测出 Ne 原子 $ns'(n=15-31)$, $nd'(n=13-30)$ 两个通道的 35 条高激发态能级, 这些能级都在 $2p^5(^2P_{1/2}^o)$ 系列的电离限以上, 属于自电离态能级。

实验中测出的共振峰波长是空气中波长值 $\lambda_{\text{空}}$, 计算能级时经过空气折射率修正后转换为真空中波长值 λ_0 , $\lambda_0 = n\lambda_{\text{空}}$ 。实验时波长为 4500 Å 左右, $n = 1.0002810^{[4]}$, 利用 λ_0 的值和 Rydberg 公式求出各个能级的位置。全部数据见表1和表2所示。从实验记录的光电流谱图上测出 ns' 和 nd' 通道的共振峰宽度。对 ns' 通道, n 从 15—31, 共振峰宽约从 0.06 Å 增大至 0.1 Å, 变化不大; 对 nd' 通道, n 从 13—30, 共振峰宽从

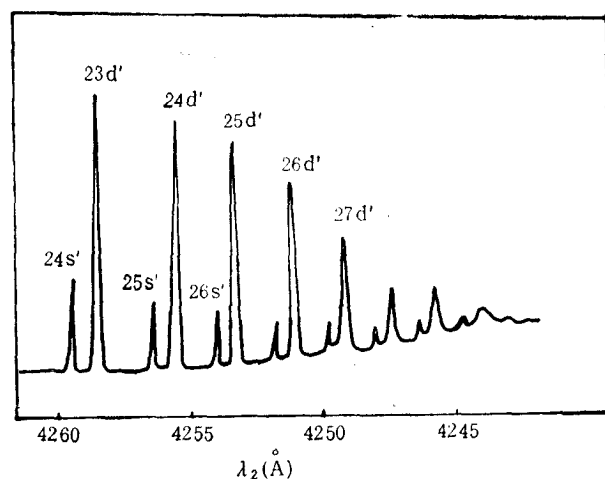


图4 Ne 原子的部分光电流光谱图

表1 ns' 能级实验值与量子亏损

主量子数 n	波长值 ($\text{\AA}$)	能级值 ($1/\text{cm}$)	量子亏损 δ
15	4330.25	174127.3	1.303
16	4315.92	174203.9	1.306
17	4304.25	174266.7	1.304
18	4294.71	174318.3	1.307
19	4286.71	174361.7	1.303
20	4280.05	174398.0	1.308
21	4274.32	174429.3	1.300
22	4269.51	174455.7	1.313
23	4265.26	174479.0	1.303
24	4261.63	174499.0	1.309
25	4258.45	174516.5	1.314
26	4255.60	174532.2	1.302
27	4253.10	174546.0	1.295
28	4250.88	174558.3	1.290
29	4248.94	174569.0	1.305
30	4247.17	174578.8	1.305
31	4245.55	174587.8	1.285

$0.06 \text{ \AA}$ 增大至 $0.6 \text{ \AA}$, 变化较大。由于 $n > 30$ 以后的光电流谱图上, 直流本底增大, 峰高变小, 峰宽增加, 已难于定准谱峰位置, 未能得到更高的自电离态能级。

将实验得到的能级数据 E_n 代入 Rydberg 公式

$$T = E_n + \frac{R}{(n - \delta)^2},$$

R 为 Rydberg 常数。将电离限 T 和量子亏损 δ 作为参数拟合之, 得到了 ns' 和 nd' 系列的电离阈值 $T = 174712.1 \text{ cm}^{-1}$ 。这个值与 Moore^[5] 能级表上 Ne 的第二电离阈值

表 2 nd' 能级实验值及量子亏损

主量子数 n	波长值 ($\text{\AA}$)	能级值 ($1/\text{cm}$)	量子亏损 δ
13	4342.79	174060.6	0.022
14	4325.90	174150.5	0.022
15	4312.36	174223.0	0.020
16	4301.35	174282.4	0.020
17	4292.31	174331.3	0.024
18	4284.70	174372.7	0.020
19	4278.32	174407.5	0.021
20	4272.89	174437.2	0.022
21	4268.24	174462.7	0.026
22	4264.13	174485.2	0.007
23	4260.70	174504.1	0.032
24	4257.65	174520.9	0.043
25	4254.85	174536.4	0.012
26	4252.47	174549.5	0.021
27	4250.33	174561.3	0.021
28	4248.45	174571.7	0.039
29	4246.76	174581.8	0.056
30	4245.22	174589.7	0.065

174712.2cm^{-1} 很接近。关于量子亏损,从实验数据得到 ns' 和 nd' 两通道的拟合值分别为 $\delta_{s'} = 1.303$ $\delta_{d'} = 0.024$ 。Johnson^[6] 曾用多通道量子亏损理论给出 $\delta_{s'} = 1.322$ $\delta_{d'} = 0.08$, 同时, 他从 Moore 能级表上数据推算出量子亏损的经验值为 $\delta_{s'}' = 1.303$, $\delta_{d'}' = 0.015$, 理论值与经验值比较相差较大, 本文实验结果与经验值比较接近。因为经验值仅从较低的 n 值出发, n 大的区域数据偏少, 从自电离态数据出发, 正好弥补了这种欠缺。从实验数据计算 ns' 和 nd' 每个能级的量子亏损, 和能级实验值 E_n 同列于表 1 和表 2 中。从表中看出, ns' 和 nd' 两通道的量子亏损都存在涨落, 相比而言, nd' 通道的量子亏损涨落较大些。对于 $n = 22, 24, 25$ 几条能级, 量子亏损偏离正常数值较大, 可能是附近存在干扰态所致, 尚待进一步研究。

nd' 系列的峰宽随 n 值增大而变宽以及 nd' 系列的量子亏损涨落较大, 都说明还有某种 Stark 效应存在。经过研究发现, 这些影响来自脉冲电源的残存电压。采用脉冲电源后, 直流放电存在于放电管两端大约 300V/cm 的电场的影响是消除了, 然而由于电路和放电管的影响, 电源负脉冲加上后, 放电管两端电压没有降到零, 而是留有 $20-30\text{V}$ 的残余电压。对于 ns' 态, 这种电场的影响不大, 对于 nd' 系列, 尤其是 n 接近于 30 时, 残余电场的影响变得明显, 使 nd' 的谱峰明显加宽, 量子亏损涨落变大。

2. nd' ($6d'-12d'$) 能级的实验值

Ne 原子高激发态的能级数据不多, 在 Moore 的能级表上, $n > 13$ 的能级数据已经空缺。Radler 曾用同步辐射光源得到一些自电离态能级, 据报道, 他用的同步辐射光源的波长为 $575\text{\AA}$ 左右, 谱线宽度为 $0.045\text{\AA}$ 即 13cm^{-1} , 由此可估计他能得到的能级数

表 3 6d—12d 能级实验值与 Moore 值

原子态	波长值 (Å)	能级值 (1/cm)	Moore 值 (1/cm)
6d[3/2] ₂	4852.61	171642.1	171642.0
6d[3/2] ₁	4851.46	171647.0	171646.9
7d[3/2] ₂	4667.38	172459.7	172459.9
7d[3/2] ₁	4666.68	172463.0	172463.0
8d[3/2] ₂	4555.08	172989.1	172989.1
8d[3/2] ₁	4554.44	172990.9	172991.0
9d[3/2] ₂	4480.85	173351.4	173351.5
9d[3/2] ₁	4480.62	173352.6	173352.8
10d[3/2] ₂	4429.42	173610.5	173610.5
10d[3/2] ₁	4429.20	173611.6	173611.5
11d	4392.10	173802.2	173802.8
12d	4364.23	173947.6	以下空缺

据的精度。我们所用激光线宽为 0.2cm^{-1} , 利用脉冲电源基本消除了 Stark 效应后, 数据应有较好的精度。为了从实验上检查数据的可信度, 测量了从 $3p'[1/2]_1 - nd'(n = 6 - 12)$ 的所有允许跃迁, 包括精细结构在内的 12 条谱线, 实验结果与已有的 Moore 能级数据符合很好, 见表 3。由此认为, 用同样方法测得的自电离态也有很好的精度。

四、结 论

利用脉冲电场代替直流放电, 激光在无电场时刻激发原子, 使激光双共振光电流光谱成为研究高电离阈原子 Rydberg 态的一种很有效的方法。本文利用这一方法, 从实验上测定了 Ne 原子 ns' 和 nd' ($n = 13 - 31$) 的 35 条自电离态能级, 导出了每个通道的量子亏损和电离限, 所得结果可靠, 精度高。

工作过程中, 曾得到中国科学院物理研究所李家明教授的许多启示和帮助, 谨表示衷心的感谢。

- [1] K. Codling, *Phys. Rev.*, **155** (1967), 26.
- [2] K. Radler *et al.*, *J. Chem. Phys.*, **70**(1979), 216.
- [3] T. Caesar, *J. De Physique, Colloque*, (1983), C7-261.
- [4] 饭田修一, 物理学常用数表, 科学出版社(1981), 115 页.
- [5] G. E. Moore, *Atomic Energy Level*, **1**(1971), 76.
- [6] W. R. Johnson *et al.*, *J. Phys. B*, **13**(1980), L13.

STUDY OF Ne AUTOIONISING STATES WITH PULSED ELECTRIC FIELD OPTOGALVANIC SPECTROSCOPY

ZHANG LIAN-FANG ZHAO WEN-ZHENG SHANG REN-CHENG

PAN LI WANG SHI-LIANG WEN KE-LING CHEN DIE-YAN

Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084

(Received 28 February 1990)

ABSTRACT

35 autoionising energy levels of Ne atom in ns' ($n=15-35$) and nd' ($n=13-30$) series have been determined experimentally with pulsed electric field optogalvanic spectroscopy. The ionization limit of the ns' and nd' series was found by parametric fitting and the quantum defects of all these levels were calculated. Instead of the direct discharge, pulsed electric field was used in the experiment, to eliminate Stark effects in the optogalvanic spectroscopy.

PACC: 3220J; 3280D