

中能电子的全截面测量装置和对氮分子的散射全截面*

邢士林 徐克尊 陈向军 杨炳忻

王永刚 庞文宁 张 芳 施启存

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230027)

(1993 年 8 月 11 日收到)

介绍一台用于中能电子散射全截面的测量装置, 并给出了 500—2600eV 电子与氮分子散射全截面的实验结果。

PACC: 3480B

1 引 言

电子与原子、分子散射全截面是电子与原子、分子相互作用的基本数据之一, 它在天体物理、等离子体物理、大气物理和化学物理等领域都有重要意义, 它还为检验关于原子分子相互作用的理论提供判据。原子、分子被电子的散射全截面实验始于 Ramsauer 的工作^[1]。在早期的实验中入射电子能量大多低于 100eV, Bederson 和 Kieffer 总结了 1971 年以前在这方面的实验研究^[2]。到 70 年代在许多实验中电子的能量已达数百电子伏特, Brandsen 和 McDowell 评述了至 1977 年的中能电子被原子散射的实验和理论工作^[3]。80 年代初在一些实验中电子能量已超过 700eV, 进入 90 年代以来全截面实验中电子能量不大于 500eV 的仍占大多数, 只有在少数实验中电子能量已超过 2keV^[4-6]。能量大于 500eV 的电子对氮分子的散射全截面测量已有许多报道^[7-11], 但电子能量大于 1600eV 的只有 Garcia 等的工作^[12]。

在电子散射全截面的测量中一般采用透射技术^[2], 即测量束流通过靶气体时随气压的衰减规律, 它的基本关系是 Beer 定律,

$$I_c = I_0 \exp(-\sigma_t NL), \quad (1)$$

其中 I_c 和 I_0 分别是当靶的气体密度为 N 和零时到达收集器的电子束流; L 是电子穿过气体的路径长度(作用长度); σ_t 是全截面。为了减小实验误差, 用下式代替(1)式:

$$\sigma_t = -(NL)^{-1} \ln [(I_c/I_0)_g / (I_c/I_0)_u], \quad (2)$$

其中 $(I_c/I_0)_g$ 和 $(I_c/I_0)_u$ 分别是有和没有充气时透射束流与初束流之比。这透射技术又可分为三种方法: 飞行时间法^[12], Ramsauer 法^[1,13]和直线透射法^[7,14]。飞行时间法只适

* 国家自然科学基金和中国科学院资助的课题。

用于低能电子的实验,直线透射法与 Ramsauer 法相比,不用磁场、有较好的角分辨且其结构和技术较简单,因而更多地被采用。

我们用最初建立的直线透射型装置^[15]测量过电子对氩、氖原子和氮分子的散射全截面^[11,16,17]。最近用改进了的装置在更高的电子能量范围测量了上述三种原子、分子的全截面^[18]。本文较详细地介绍本装置并给出 500—2600eV 电子对氮分子的散射全截面实验结果以及与发表的实验结果的比较。

2 装 置

本装置的简图如图 1。这与最初装置的主要区别是: 1) 用电容压力规代替麦克劳计测气体压强; 2) 用五极透镜代替三极透镜; 3) 减少一组真空泵和缩小差分抽气的孔径; 4) 减小分析器的中间极 (P_0) 膜孔的直径(从 2 至 1mm)。

由于使用了以 MKS-127A 为探头的电容压力规测量靶室的气压, 使气压测定的误差由 2.5% 下降至 1% 以下。用五极透镜比用三极透镜可在更高更宽的电子能量范围得到好的束流条件(即在碰撞室内有细束近轴束流)。对这五极透镜的设计参考了文献 [19]。在五极透镜的前后两极 (V_1 和 V_5) 上分别装有直径为 0.2 和 0.5mm 的膜孔 P_{v1} 和 P_{v5} , 在中间极 (V_3) 内设有一个偏转板。如表 1 的电位分配是电子能量在 1200 eV 附近有好的束流条件的一组典型值。

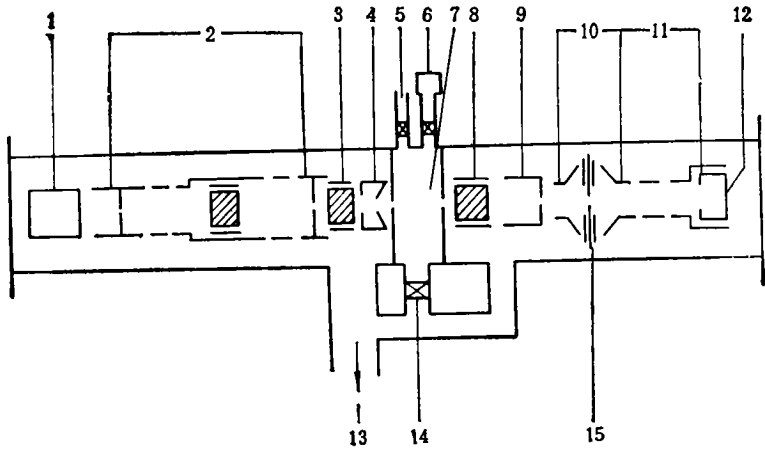


图 1 实验装置简图

1 为电子枪; 2 为五极透镜; 3 为第三偏转板 (Q_3); 4 为第一法拉第筒 (F_{e1}); 5 为供气口; 6 为气压计探头; 7 为碰撞室; 8 为第四偏转板 (Q_4); 9 为第二法拉第筒 (F_{e2}); 10 为分析器; 11 为后透镜; 12 为第三法拉第筒 (F_{e3}); 13 为泵口; 14 为蝶阀; 15 为过滤膜片 (P_0)

表 1 五极透镜的电位分配

单 元	V_1	V_2	V_3	V_4	$V_5^\dagger$
电位/V*	1500	331	770	436	1200

* 为相对于电子枪阴极灯丝电位(V);

† 为 V_5 保持零电位(地电位)。

从原装置减少一组真空泵后不影响实验时的真空度, 现碰撞室的真空本底仍可小于 1mPa 。 F_{c1} 的出口孔径为 1mm 。碰撞室两端的差分板孔径均从 3mm 改为 1.2mm 。

参考了文献[7,20]并作少许改进后建立的分析器是一个五极过滤透镜分析器, 适当调节 P_6 的电位, 使其略低于电子枪阴极电位, 可以阻止非弹性散射的电子通过。从 F_{c3} 测得的束流强度随 P_6 电位的变化可以得到束流的积分能谱和微分能谱曲线, 多次测量得到分析器的能量分辨率约为 0.85eV , 这比原装置在相近能区的能量分辨要好^[15]。这主要是由于减小了 P_6 膜片孔径的结果。

F_{c2} 的出口孔径为 1.65mm , 它离碰撞室中心的距离为 184mm , 因此分析器入口对碰撞室中心所张的立体角 ($\Delta\Omega$) 为 $6.3 \times 10^{-3}\text{Sr}$ 。由 $\Delta\Omega$ 和从文献[21,22]外推得到的零度附近微分截面值, 可以估计, 在电子能量小于 3keV 时小角度弹性散射对全截面的贡献在 0.2% 以内。

对电子束能量 (E_e) 的刻度借助于六位半数字电压表。

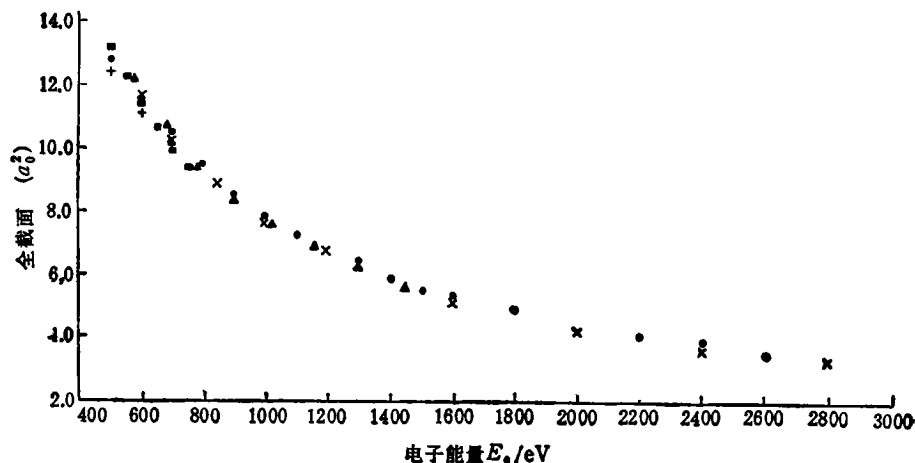


图2 $e^- - \text{N}_2$ 散射全截面

● 为本工作 ▲ 为文献[8]; × 为文献[10]; ■ 为文献[7]; + 为文献[9]

3 500—2600eV 电子对氮分子的全截面

实验用的氮气纯度为 99.99% 。相互作用长度定为 215mm 。从图2和表2可见, 本文结果与已发表的实验结果^[7-10]在本实验的能量范围符合得较好, 其中在 900 至 1500eV 范围符合得更好。在 1600 至 2600eV , 文献[10]的结果比本文结果按曲线走向平均偏低 2.4% 。在 500 至 1000eV , 这次结果比我们以前的工作(用三极透镜)^[11]平均偏高 3% 。

本文实验结果误差估计为 5% , 其中包括 2% 的系统误差(多数是使结果偏高)和 $\pm 3\%$ 的随机误差。系统误差主要是因差分抽气不太好影响了作用长度 L 的值和在电子能量大于 1600 和小于 600eV 处, 有时调试出的电子光学条件不太好。影响差分抽气的原因是碰撞室与 F_{c1} 之间抽气不畅。随机误差估计见表3。

Liu^[23] 和 Jain 等^[24]对氮分子的散射全截面作了理论计算。Jain 计算结果可在 10—

表 2 500—2800eV 散射全截面 (a_0^2)⁻¹

E_e/eV	本工作 ¹⁾	文献[10] ²⁾	文献[8] ³⁾	文献[7] ⁴⁾	文献[9] ⁵⁾
500	12.79			13.19	12.36
550				12.26	
576			12.12		
600	11.48	11.6		11.39	11.07
650				10.60	
676			10.68		
700	10.46	10.2		9.89	10.11
750				9.36	
784			9.36		
800	9.54				
850		8.80			
900	8.52		8.32		
1000	7.74	7.62			
1024			7.57		
1100	7.24				
1156			6.81		
1200	6.64	6.69			
1296			6.14		
1300	6.36				
1400	5.90				
1444			5.57		
1500	5.48				
1600	5.29	5.00	5.07		
1800	4.82				
2000	4.22	4.18			
2200	3.96				
2400	3.85	3.52			
2600	3.39				
2800		3.20			

总误差: 1) 为 5%; 2) 为 3%; 3) 为 2.5%; 4) 为 4%; 5) 为 8%, 包括理论校正的误差.

表 3 随机误差的来源与估计值

误 差 来 源	估计值/%
束流不稳(因供气不稳和束流条件变化)	1.5
束流值的观测差异	≤1
MKS 电容压力计对气压的测定	≤1
电流计的非线性	0.5
电子能量的确定	0.5
碰撞室内温度的确定	≤0.6
供电电源不稳	0.5

5000eV 范围与实验结果符合,还给出了如下的全截面拟合曲线的表达式:

$$\frac{E}{R} \frac{\sigma_i}{4\pi a_0^2} = a' \ln \frac{E}{R} + b' \frac{R}{E} + c'$$

(3)

其中, E/R 为以里德堡能量为单位的电子能量; a_0 为玻尔半径; a', b' 和 c' 是与原子、分

子种类有关的参数。在 500—2600eV 电子对氮分子的散射中, 对全截面的主要贡献为 (3) 式等号右端第一项 (来自电子与核外电子的非弹性散射) 和第三项 (来自弹性散射)。

- [1] C. Ramsauer, *Ann. Phys., Lpz.*, **64**(1921), 513; *Ann. Phys., Lpz.*, **66**(1921), 546.
- [2] B. Bederson and L.J. Kieffer, *Rev. Mod. Phys.*, **43**(1971), 601.
- [3] B.H. Brandsen and M.R.C. McDowell *Phys. Rep.*, **46**(1978), 249.
- [4] G. Garcia *et al.*, *Phys. Rev.*, **A24**(1990), 4400.
- [5] A. Zecca *et al.*, *J. Phys. B*, **24**(1991), 2737; **24**(1991), 2747.
- [6] A. Zecca *et al.*, *Phys. Rev.*, **A45**(1992), 2777; **A46**(1992), 3877.
- [7] H.J. Blaauw *et al.*, *J. Phys. B*, **13**(1980), 359.
- [8] G. Dalba *et al.*, *J. Phys. B*, **13**(1980), 4695.
- [9] K.R. Hoffman *et al.*, *Phys. Rev.*, **A25**(1982), 1393.
- [10] G. Garcia *et al.*, *Phys. Rev.*, **A38**(1988), 654.
- [11] 陈向军等人, 物理学报 **41**(1992), 885.
- [12] R.E. Kennerly, *Rev. Sci. Instrum.*, **48**(1977), 1682.
- [13] G. Dalba *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **52**(1981), 979.
- [14] K. Jost and B. Ohnemus, *Phys. Rev.*, **A19**(1979), 641.
- [15] 陈向军等人, 第六届原子与分子物理全国学术会议论文集 (长春, 吉林大学出版社, 1992), 158 页.
- [16] 邢士林等人, 科学通报, **37**(1992), 405.
- [17] 杨炳忻等人, 科学通报, 待发表.
- [18] 徐克尊等人, 第 18 届电子和原子碰撞物理国际会议文集 (丹麦, 1993 年 7 月), 待发表.
- [19] E. Harting and F.H. Read, *Electrostatic Lenses* (Elsevier Scientific Publishing Company, 1976).
- [20] J. Kessler and H. Lindner, *Z. Angew. Phys.*, **18**(1964), 7.
- [21] R.H. Jansen *et al.*, *J. Phys. B*, **9**(1976), 185.
- [22] R.D. DuBois and M.E. Rudd, *J. Phys. B*, **9**(1976), 2657.
- [23] J.W. Liu, *Phys. Rev.*, **A35**(1987), 591; **A32**(1985), 1384.
- [24] A. Jain and K.L. Baluja, *Phys. Rev.*, **A45**(1992), 202.

DEVICE FOR MEASURING THE TOTAL CROSS-SECTION (TCS) OF ELECTRON SCATTERING AND THE EXPERIMENTAL ELECTRON-MOLECULAR NITROGEN TCS AT INTERMEDIATE ENERGY

XING SHI-LIN XU KE-ZUN CHEN XIANG-JUN YANG BING-XIN

WANG YONG-GANG PANG WEN-NING ZHANG FANG SHI QI-CUN

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(Received 11 August 1993)

ABSTRACT

This paper presents a device designed for the absolute measurement of total electron-atom and electron-molecule cross section at intermediate energy. The experimental total cross sections for electron scattering from nitrogen molecular in the energy range 500—2600eV are also given.

PACC: 3480B